

한반도 겨울철 기온 계절예측을 위한 기후인자 선정 및 통계 모델 개선

Improvement of statistical model and discovery of predictors for seasonal
prediction of winter temperature over the Korean Peninsula

우성호

한반도 겨울철 기온 계절예측을 위한 기후인자 선정 및 통계 모델 개선

Improvement of statistical model and discovery of predictors for seasonal
prediction of winter temperature over the Korean Peninsula

우성호

발간사

기온 및 강수의 계절예측 정보는 국민들의 일상생활뿐만 아니라 농업, 산업, 수문, 경제 등 다양한 분야에서 활용성이 높다. 특히 계절예측 정보는 1주~2개월의 선행시간을 가지므로 위험 관리 및 정책 결정의 기초자료로 활용되어 사회·경제적 비용을 절감할 수 있다. 이러한 예측정보의 활용성을 높이고 실제 성과를 얻기 위해서는 기본적으로 정보의 신뢰성이 뒷받침되어야 하지만 1~2일의 선행시간을 가지는 단기예보에 비해 상대적으로 계절예측 정보의 정확도 수준은 매우 낮은 현실이다.

익월부터 3개월의 기후에 대한 전망을 제공하는 계절예측의 정확도가 낮은 것은 대기의 비선형적인 그리고 카오스적인 성질에 의한 예측의 본질적인 한계가 존재하기 때문이다. 하지만 이를 감안하고서도 계절예측 정보는 매우 중요하게 활용이 가능하므로 신뢰성을 높이기 위해 전 세계적으로 다방면의 노력이 이루어지고 있다. 특히 계절예측을 위한 수치모델 개발 및 개선은 신뢰성 높은 예측 정보 생산을 위해 가장 중요한 부분 중 하나이지만, 지속적이고 장기적인 노력이 필요하여 단기간에 성과를 기대하기 어렵다. 따라서 다양한 방법으로 계절예측 정보를 생산하여 정확도를 향상시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 과거 관측자료에 기반하여 우리나라(남한) 겨울철 기온과 물리·역학적으로 자연상관성을 가진 예측인자를 찾고, 이를 활용하여 안정적인 겨울철 월별 통계모델을 개발하였다. 이 통계모델은 간단한 회귀분석을 기반으로 구축되어 기온 예측 정보의 생산이 용이할 뿐만 아니라 예측 결과에 대한

이해가 쉬워 활용도가 높을 것으로 판단된다. 또한 통계모델을 이용하여 기온 예측정보를 생산할 때 사용된 예측인자들은 우리나라 기상청의 현업 계절예측 생산 일정을 고려하여 발굴되었으므로, 실제 현업에서 예보관의 의사결정에 정보를 제공할 수 있어 우리나라 겨울철 기온 계절예측의 정확도 향상에 기여하기를 기대한다.

끝으로 본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었습니다. 먼저 연구결과가 나오기까지 본연구를 수행해 주신 우성호 박사의 노고에 감사드리며 연구의 완성도를 높일 수 있게 조언해 주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다. 또한 자문위원으로 연구의 바른 방향을 제시해 주신 안중배 교수님과 이명인 교수님 그리고 민승기 교수님께 감사드립니다. 엘니뇨 및 빙권 요소와 우리나라 겨울 기온 변동에 대해 조언해 주신 국종성 교수님과 김백민 박사님께도 감사의 말을 전합니다. 마지막으로 현업 계절예측에 적응하고 알아 가는데 큰 도움을 주신 기상청의 김현경 기후예측과장님, 이현수 사무관, 임소영 사무관에게도 감사드립니다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 기대합니다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

The predictability of seasonal prediction for surface air temperature (SAT) in present is not competent over the mid-latitude, especially over East Asia including the Korean Peninsula. One of the reasons for low predictability of seasonal prediction is closely associated with the unreliable predictability of the operational dynamic models with 3~4 weeks lead time over the East Asia region. Moreover it is unfeasible that the performance of the dynamic model will be improved within the short-term. Therefore, more information such as the statistical relationship between the predictant (i.e. SAT in the Korean Peninsula) and other climate factors based on the historical dataset is able to be critical for improving the predictability of the operational seasonal prediction.

In this study, the statistical prediction model for the SAT over the Korean Peninsula in individual months of the winter season is developed based on multiple regression analysis. For the stable predictability of the model, we tried to discover the climate predictors that are linked physically and dynamically to the SAT in the Korean Peninsula. The possible mechanisms of the relationship between the winter SAT in the Korean Peninsula and its predictors are also suggested in this report.

For predicting the SAT in December, three predictors such as the sea ice concentration (SIC) over the Kara-Laptev sea, the tendency of ENSO-related sea surface temperature (SST) over the eastern Pacific and Eurasian snow cover information are used. The relationship between the predictors and the SAT in December is stable during the training period. The model shows the high correlation skill between the prediction and observational SAT (correlation coefficient : 0.75).

The SAT predicted in cross validated hindcast is also highly correlated with the observational SAT (correlation coefficient : 0.71).

The models for the SAT in January and February are also constructed using predictors linked dynamically to the SAT in the Korean Peninsula such as the SIC over the upstream region, the SST variability in the tropical Pacific, the SST variability over the North Atlantic, and circulation in upstream of East Asia. Even though the correlation skills of the models for the SAT in January and February are somewhat less than the model for the SAT in December, the models also show useful skill in the correlation between predicted SAT and observation (correlation coefficients : both 0.66 in January and February).

We expect that the prediction information produced using our statistical prediction model will be useful and helpful in the operational seasonal prediction for the SAT in the Korean Peninsula.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	9
2.1 연구 자료	9
2.2 연구 방법	11
3. 우리나라 겨울철 기온 변동과 연관된 기후감시인자	12
3.1 전 지구 대기순환장 및 기후요소(해수면온도, 해빙, 눈덮임)와의 동시상관성	12
3.2 저주파 변동(Low-frequency variability)과의 동시상관성	16
3.3 주요 기후인자 위상에 따른 우리나라 기온 경향	18
3.3.1 ENSO(El-Nino Southern Oscillation)	18
3.3.2 AO(Arctic Oscillation)	22
3.3.3 카라-바렌츠 해 해빙	27
3.3.4 WP(Western Pacific pattern)	29
4. 우리나라 겨울철 기온 예측인자 및 통계예측 모델 구축	36
4.1 12월 기온 예측	36

4.1.1 12월 기온 예측인자-----	36
4.1.1.1 카라-랍테프 해(Laptev Sea) 해빙농도 -----	36
4.1.1.2 가을철 동태평양 해수면온도 경향성(Tendency) : ENSO-----	42
4.1.1.3 10월 유라시아 눈덮임속도 -----	44
4.1.2 12월 기온 통계예측 모델 및 검증 -----	49
4.2 1월 기온 예측 -----	55
4.2.1 1월 기온 예측인자-----	55
4.2.1.1 카라 해(Kara Sea) 해빙농도 -----	55
4.2.1.2 가을철 태평양 해수면온도 경향(Tendency)의 동서경도(Gradient)-----	59
4.2.1.3 타미르반도 상층 지위고도 -----	64
4.2.2 1월 기온 통계예측 모델 및 검증 -----	69
4.3 2월 기온 예측 -----	77
4.3.1 2월 기온 예측인자-----	77
4.3.1.1 10월 바렌츠(Barents) 해 해빙농도-----	77
4.3.1.2 가을철 호주 북쪽 해수면온도 경향-----	81
4.3.1.3 10월 걸프해류 해수면온도 -----	84
4.3.2 2월 기온 통계예측 모델 및 검증 -----	88
 5. 결론 -----	 94
 6. 토론-선형 통계예측 모델의 한계 -----	 98
 Ⅰ REFERENCE -----	 101

1. 서론

계절예측(Seasonal prediction) 정보는 사회·경제적인 부가가치의 창출뿐만 아니라 자연 재해로 인한 재산피해를 줄이고 미리 대비하는데 중요하게 활용될 수 있다. 따라서 정확한 계절예측 정보에 대한 사회, 경제 및 산업 분야(특히, 에너지, 수문, 농업 등)의 요구가 증가하였고 그에 따라 전 세계 많은 국가에서 보다 정확한 계절예측 정보를 생산하고 공공에 서비스하기 위한 노력이 진행 중이다. 하지만 현재의 기술력에 기반한 현업 계절예측의 정확도는 매우 낮은 것으로 보고되고 있다(기상청, 2012).

계절예측의 정확도가 낮은 가장 중요한 요인 중에 하나는 역학모델의 3~4주 이상 및 계절예측 기간에 대한 예측 정확도를 보장할 수 없기 때문이다. 전 세계적으로 가장 우수한 수치모델로 알려진 ECMWF(European Centre for Medium-range and Weather Forecasting)와 미국의 CFSv2(NCEP Coupled Forecast System model version 2)의 겨울철 지상기온과 강수에 대해 계절예측성(1개월 lead)을 조사한 결과, 예측성의 대부분은 열대 특히 태평양 지역에서 강하게 나타나고 ENSO(El-Nino Southern Oscillation)의 영향을 직접적으로 받는 북태평양과 북미 일부지역을 제외한 북반구 중위도 지역에서 예측성은 급격히 떨어지는 것으로 나타났다(Kim et al. 2012).

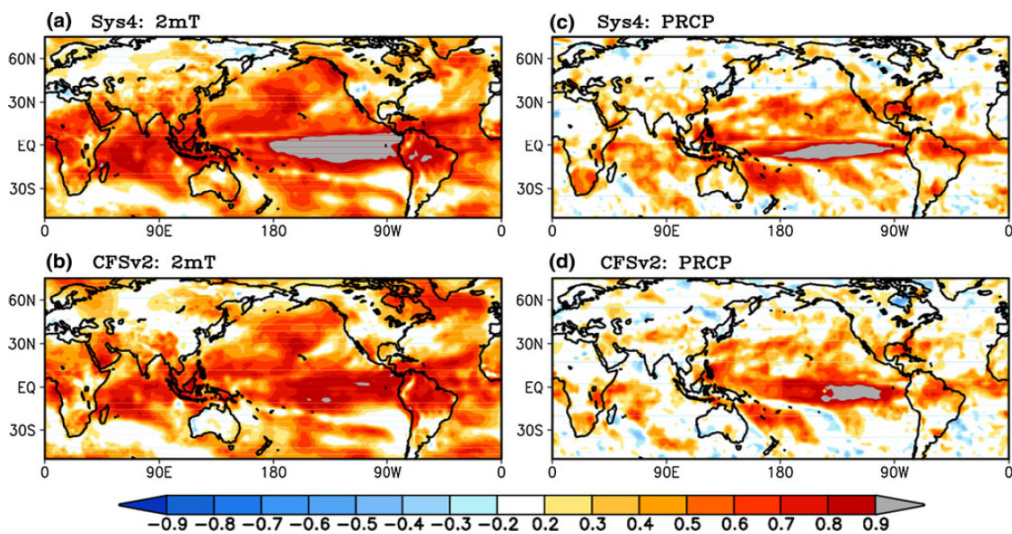


Figure 1.1 Correlation coefficients of (left) 2 meter temperature and (right) precipitation for (top) ECMWF Sys4 and (bottom) CFSv2 for the period of 28 years from 1982 to 2009 winter (Source : Kim et al. 2012)

역학모델의 예측성은 앙상블 멤버의 수에 영향을 받고(Kumar and Hoerling 2000) 일반적으로 다중모델 앙상블 예측이 각 개별 모델의 예측에 비해 믿을만한 예측성을 보여준다는 연구 결과들이 보고되고 있다(Kirtman et al. 2014; Palmer et al. 2004). Lee 등은(2013)은 겨울철 기온에 대한 각 개별 모델과 다중모델 앙상블 평균의 기온 예측성을 조사하였는데 사용된 모델 중 절대 다수에서 동아시아 지역 기온 예측성은 매우 낮았으며 다중모델 앙상블의 결과의 정확도 또한 신뢰할 만한 수준이 되지 못하는 것으로 나타났다(Fig. 1.2).

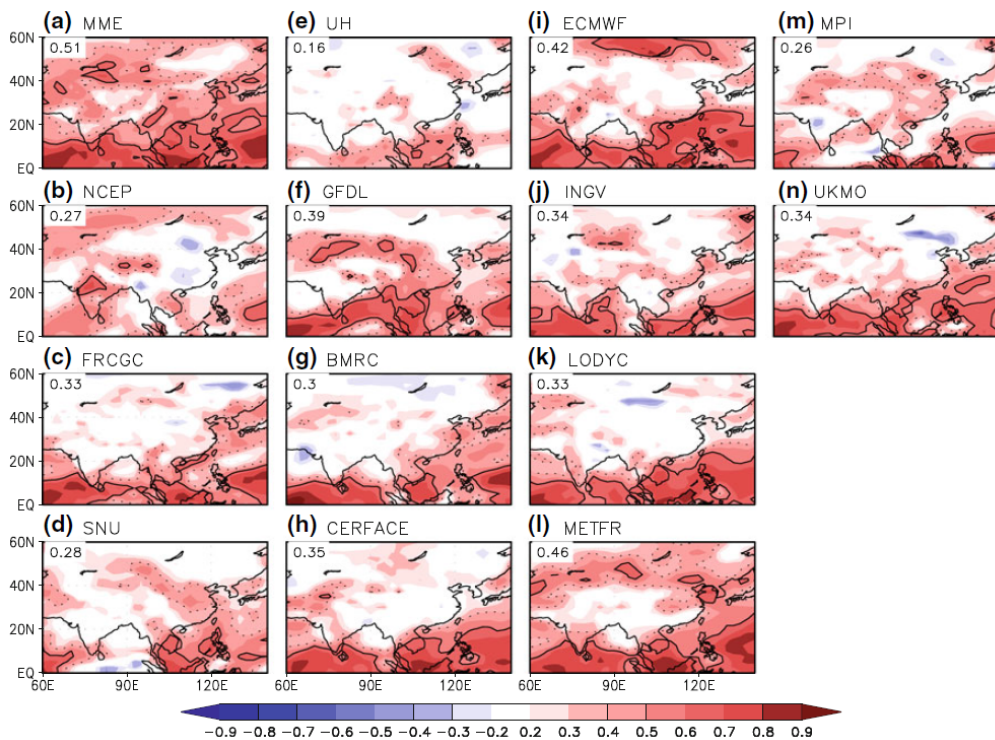


Figure 1.2 The temporal correlation coefficient skill for 1-month lead DJF prediction of 2m temperature obtained from 13 coupled models and their MME over Asian winter monsoon region (Source : Lee et al. 2013)

역학 모델의 정확도를 개선하기 위해서는 많은 시간과 인력이 필요하므로, 당장 계절예측을 생산해야하는 현업기관에서는 역학 모델 결과 이외에도 유사사례 분석, 통계예측 모델 등의 과거자료를 활용한 분석 기반의 예측과 정보를 활용하여 최종 계

절 예측을 결정하는데 활용하고 있다. 그 중에서도 다중선형 통계예측 모델은 계절예측 타겟변수와 그 예측인자들 사이의 상관성에 기반하여 통계적 방법을 통해 간단한 1차원 식으로 표현한다. 따라서 감시하는 예측인자의 정보만으로 예측값을 계산할 수 있어 쉽고 효율적으로 계절예측 정보를 생산이 가능하다.

하지만 통계예측 모델은 훈련기간(Training period) 동안의 예측인자와 예측타겟 변수 사이의 상관성에 기반하여 구축되므로 실제 예측기간에 상관성이 변하면 예측성을 확보할 수 없는 태생적 약점을 가지고 있다. 하지만 예측인자와 예측변수가 물리·역학적으로 연결되어 있다면 이 둘 사이의 상관성의 변동은 기간에 따라 적을 가능성이 높고, 따라서 상대적으로 안정적인 모델 구축이 가능하다. 과거에도 겨울 기온의 계절예측성 향상을 위해 예측인자 발굴과 통계 모델을 개발하고(기상청 2015) 이를 예측에 활용하였지만, 기존의 모델은 훈련 기간(1979~2008년) 이후 실제 예측(2009~2014년)에서는 예측성능이 떨어지는 특징을 보였다. 이는 우리나라 겨울 기온과 예측변수 사이의 물리·역학적 관계를 설명하기 어렵거나 우리나라 기온 변동에 영향을 미치는 기후인자의 변화 등에서 비롯되었을 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 물리·역학적 설명이 가능한 예측인자를 발굴하고, 이들에 기반한 우리나라 겨울철 기온 통계예측 모델을 구축하고자 한다.

4 | 한반도 겨울철 기온 계절예측을 위한 기후인자 선정 및 통계 모델 개선

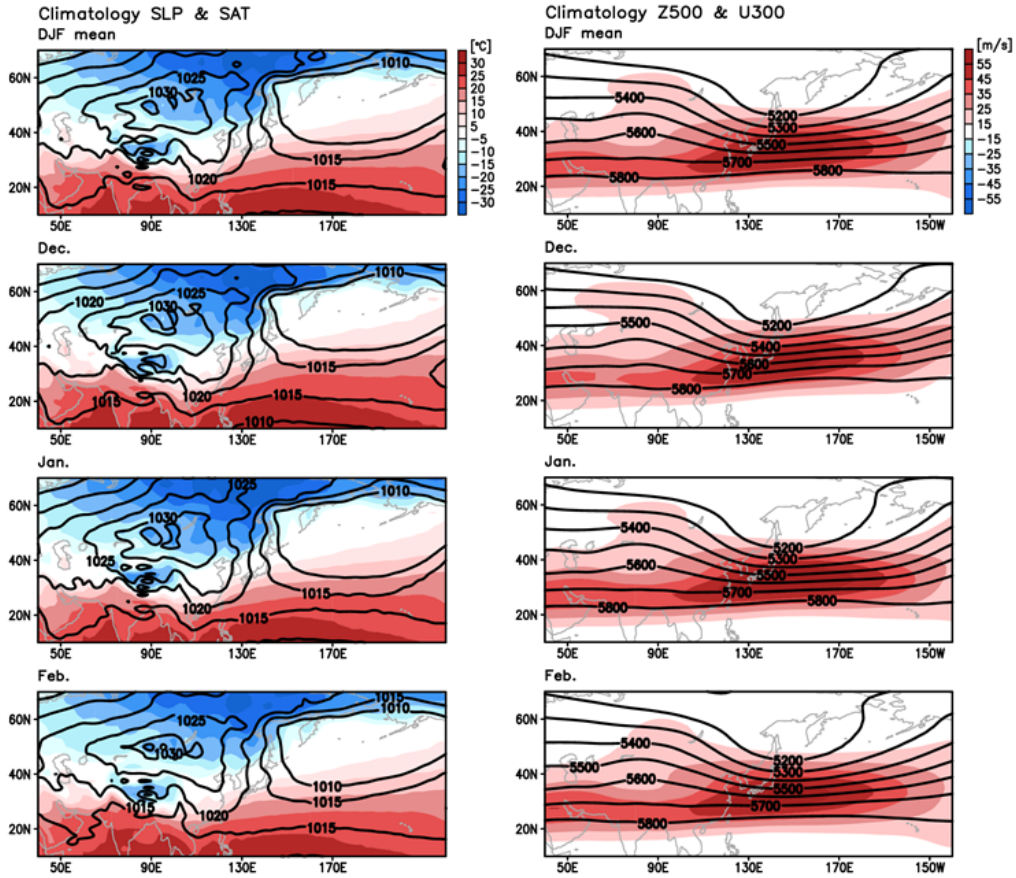


Figure 1.3 (Left column) Climatological sea-level pressure and SAT over East Asia for DJF-seasonal mean, Dec., Jan. and Feb. (Right column) Same as left column except for geopotential height at 500hPa and zonal wind at 300 hPa

동아시아 겨울철 기온의 변동은 동아시아 겨울몬순 시스템의 영향을 지배적으로 받는다(Jhun and Lee 2004; Jeong et al. 2011). 겨울철 유라시아 대륙이 빨리 식고 북태평양은 상대적으로 덜 식어 발생하는 열적 차이에 의해 유라시아 대륙 동안의 대류권 상층에는 기후학적으로 기압골(Trough)이 나타나게 된다. 이와 연관되어서 대기 하층의 시베리아 지역에는 강한 고기압(Siberian High)이 발달하기 좋고 상대적으로 북태평양에서는 알루산 저기압(Aleutian Low)이 위치하여 우리나라를 포함한 동아시아 지역에서는 기후학적으로 차가운 북풍이 지배하는 구조를 가지게 된다. 동아시아 겨울철 기온은 이 북풍계열의 바람의 강도 변화와 아주 밀접하게 연관되어 있다(Fig. 1.3).

이러한 동아시아 몬순은 다양한 저주파 변동(Low-frequency variability)의 영향을 받는다. 북극진동(Arctic Oscillation, AO)은 동아시아 몬순을 구성하는 주요한 요소인 동아시아 상층 기압골과 하층의 시베리아 고기압의 변동과 연관되어 있어 AO의 위상에 따라 동아시아의 평균 기온뿐만 아니라 겨울철 극한현상 중 하나인 한파의 발생 강도 및 빈도가 변화하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다 (Jeong et al., 2005; Park et al., 2010, Woo et al. 2012). 구체적으로 음의 AO 위상일 경우가 양의 위상일 때에 비해 동아시아는 평균적으로 춥고 강한 한파가 자주 발생하는 경향이 있다.

최근 지구온난화 및 급격한 기후변동의 변화로 북극지역 해빙(Sea ice concentration, SIC)은 급격하게 감소하고 있는 추세이다. 북극해는 기후학적으로 9월 가장 적은 면적에서 해빙으로 덮이는데 최근 급격한 해빙 감소로 인해 가을철 해빙농도가 매우 감소하고 있다. 가을철 해빙이 적으면 그 메모리(많이 녹으면 다시 얼어붙기 어려움)에 의해 겨울철에도 해빙이 적은 경향이 강해 겨울철 북극권의 순환장에 영향을 미칠 수 있다(Francis et al. 2009; Honda et al. 2009; Overland et al. 2010; Petoukhov and Semenov 2010; Wu et al. 2011;2015; Wu et al. 2016). 특히 최근 연구결과에 따르면 바렌츠-카라 해 해빙의 감소는 그 지역에서의 높은 기온 편차와 우랄산맥 부근 블로킹의 발달과 깊게 연관되어 있으며, 그 풍하층에 위치하는 동아시아 지역에서는 기압골이 발달하고 하층의 시베리아 고기압이 발달할 수 있는 호조건을 만들어 낮은 기온을 보이는 경향이 있음이 알려져 있다(Honda et al. 2009; Kug et al. 2015; Mori et al. 2014; Overland et al. 2015). 뿐만 아니라 늦가을 해빙의 감소와 연관된 아북극권 및 중위도 순환장의 변화는 연직으로 전파하는 행성파(Planetary wave)의 양을 증가시켜 겨울철 성층권 극소용돌이의 약화를 유발한다. 이는 다시 대류권 음의 AO에 영향을 미쳐 유라시아 대륙과 동아시아에 기온을 낮추는데 기여할 수 있음이 제시되었다(Kim et al. 2014; King et al. 2015; Nakamura et al. 2015; Woo et al. 2015a).

동아시아 겨울몬순의 변동은 극지역의 영향뿐만 아니라 열대의 영향도 받는 것으로 알려져 있다(Chen et al. 2013; Huang et al. 2014; Kim et al. 2014; Lee et al. 2005; Wang et al. 2008). 엘니뇨-남방진동(El-Nino Southern Oscillation)과 연관된 서태평양의 대류활동의 변동은 로스비 파(Rossby wave)를 형성하여 북반구 중위도 지역 순환장에 영향을 미치고 특히 12월에 일본을 중심으로 고기압성 순환 편

차를 유도하여 동아시아 및 우리나라 기온 변동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Kim et al. 2014; Son et al. 2014). 또한 Madden-Julian Oscillation(MJO)은 계절 내 변동 규모에서 동아시아 한파의 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Jeong et al. 2005; Park et al. 2011). 하지만 이러한 선행 연구들은 동아시아 겨울 몬순 또는 동아시아 지역의 기온 변동에 초점을 맞추었고 그와 연관된 장주기 변동 및 기후인자에 대해 연구하였고, 아직까지 우리나라 기온 변동과의 연관성을 제시한 논문은 많지 않다.

우리나라도 기본적으로 동아시아 겨울몬순의 영향을 받아 기온이 변동되지만 몽골이나 중국 동북부 등의 내륙 지역과 아열대에 가까운 중국 남부지역과는 다소 다른 기온 변동 특성을 보인다(Song et al. 2016; Wang et al. 2010). 이는 우리나라 기온 변동에 영향을 미치는 영향인자가 동아시아의 다른 지역과 다소 차이가 있을 가능성, 또는 같은 기후인자가 영향을 미치더라도 그 기여도에서 차이가 있을 가능성을 의미한다. 일례로 AO는 유라시아 대륙 및 중국 동북부 지역의 겨울철 기온과는 0.5 이상의 높은 상관성을 보이지만, 우리나라 기온(45개 지상관측소 기온)과는 0.3 ~ 0.4 정도의 상관성만을 보인다(Fig. 1.4). 이러한 특징은 우리나라 기온 변동은 동아시아 다른 지역에 비해 상대적으로 AO에 의한 영향을 적게 받는 것을 의미하고 다른 인자들의 영향이 상대적으로 크게 받을 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 우리나라(남한) 겨울철 기온과 물리-역학적으로 연관된 예측인자 및 기후감시 인자를 발굴하고 그에 기반한 통계예측 모델을 구축할 필요가 있다.

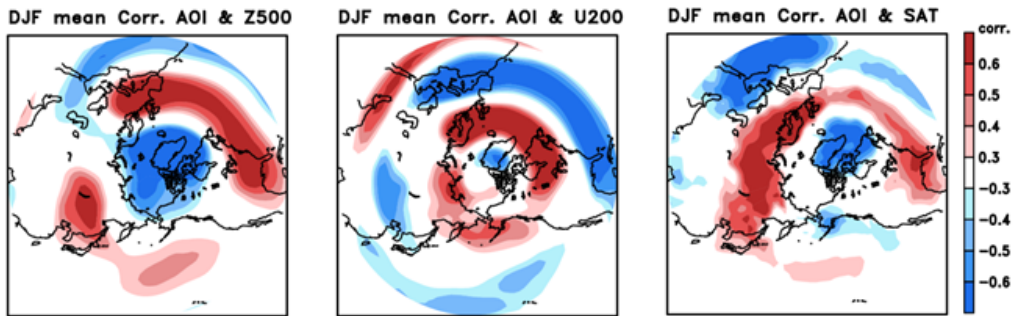


Figure 1.4 Correlation map between AO index and height at 500 hPa (Z500, Left), zonal wind at 200 hPa (U200, Middle) and surface air temperature (SAT, Right)

본 연구는 기상청과 APEC 기후센터에서 우리나라 겨울철 기온 계절예측 의사결정 지원하기 위한 통계예측 모델 개발을 목표로 하고 있다. 따라서 계절예측 정보 생산 체계와 일정에 대해 이해하고 자료의 활용가능 여부 등을 고려하여 모델을 구축할 필요가 있다. 그림 1.5는 우리나라 기상청의 계절예측 정보 생산의 과정을 보여준다. 우리나라 기상청은 매월 넷째 주(약 23일 경)에 다음 달부터 3개월 동안 월 별 우리나라 평균 기온과 강수에 대해 3분위 확률 예측 자료를 생산하여 대국민 서비스 한다. 따라서 계절예측 정보를 생산하기 위한 통계예측 모델 결과를 포함한 다양한 예측 자료(기상청 역학모델, 전 세계 다중모델 및 그 앙상블 결과, 유사사례 분석 결과 등의 기타 분석 자료)는 매월 둘째 ~ 셋째 주 전에 생산되어야 하는 것이 현실이다. 결과적으로 통계예측 모델에서 활용 가능한 월 자료는 예측대상 계절의 첫째 달 보다 두 달 전의 자료, 즉 겨울철 12월, 1월, 2월 예측을 위해 사용할 수 있는 월 평균자료는 10월 자료가 된다. 따라서 본 연구에서는 겨울철 월 별 기온과 물리-역학적으로 설명이 가능하고 준 실시간 자료 확보가 가능한 10월 이전의 예측인자를 사용하여 통계예측 모델을 구축하고자 한다. 뿐만 아니라 본 연구 결과의 현업 활용을 위해 기후 감시 및 예측인자의 새로운 발굴 및 통계예측 모델 구축과 함께 선행 연구된 부분에 대해서는 이해하기 쉽게 정리하는 작업도 함께 이루어졌음을 밝힌다.

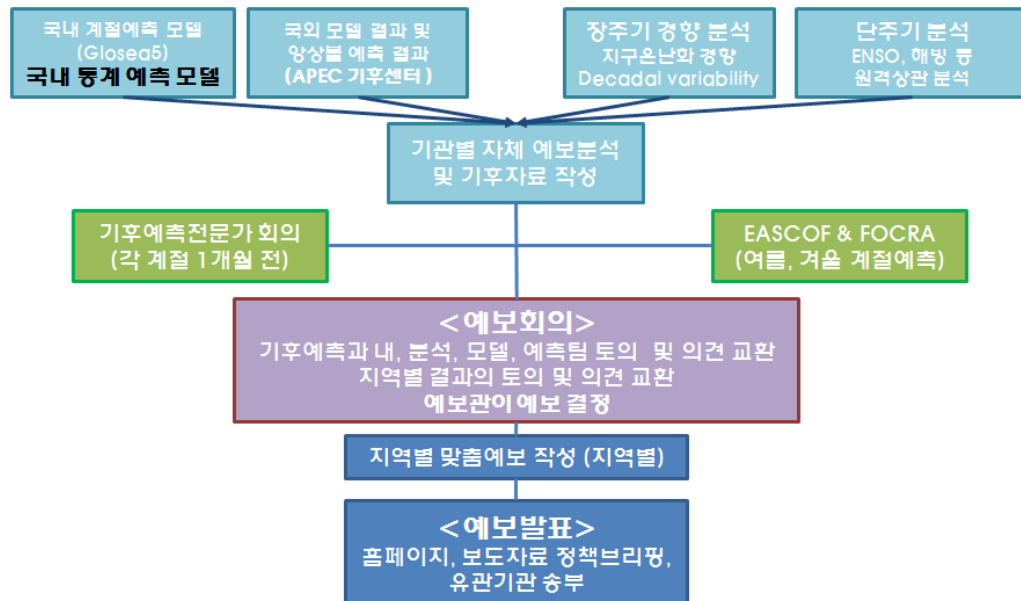


Figure 1.5 Operational process for production of seasonal prediction information in the Korea Meteorological Administration

2장에서는 사용된 연구 자료와 분석 및 통계예측 모델 구축 방법에 대해 기술하고, 3장에서는 겨울철 월 별 기온과 기후인자와의 동시상관성 분석을 통한 우리나라 기후에 영향을 미치는 기후감시인자들을 제시하고 그 인자들의 위상에 따른 우리나라 기온 경향을 분석하였다. 4장에서는 월 별 예측인자를 선정하고 지연상관성을 설명할 수 있는 물리-역학(Possible mechanism)을 기술하였다. 또한 이들에 기반한 통계예측 모델을 구축하고 안정성을 평가한 결과를 제시하였다. 뿐만 아니라 월 별 예측 모델과 실제 관측 사이의 오차가 발생하는 원인에 대해 일부 분석한 결과에 대해 논의하였다. 5장과 6장에서는 연구결과를 요약하고 통계 모델의 한계에 대한 토론하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구 자료

기상청은 물리적 위치의 이동 없이 장기간 지속적으로 관측이 이루어진 45개소를 선정하고 안정적인 관측이 이루어진 1973년 이후의 자료를 기후분석에 활용하고 있다. 본 연구에서는 활용 가능한 1973 ~ 2015년 사이의 지상기온(Surface air temperature, SAT) 자료를 모두 사용하여 예측인자 발굴 및 통계예측 모델 구축에 사용하였다. 그림 2.1은 우리나라 겨울철 평균 및 월 별 지상기온의 시계열을 보여준다. 1985년 이전에는 음의 편차가 지배적인데 반해 1980년대 후반부터 2000년대 초반까지는 양의 기온 편차가 지배하였고, 최근 10여년 간은 다시 음의 편차가 우세해지면서 10년 이상의 장주기의 변동 특성이 나타난다(특히, 12월이 뚜렷함). 본 연구에서는 이러한 장기 변동성을 고려함과 동시에 통계모델이 특정 기간에 과적합되는 것(Decadal overfitting)을 경향을 줄이기 위해 활용 가능한 전 기간을 사용하여 모델을 구축하였다.

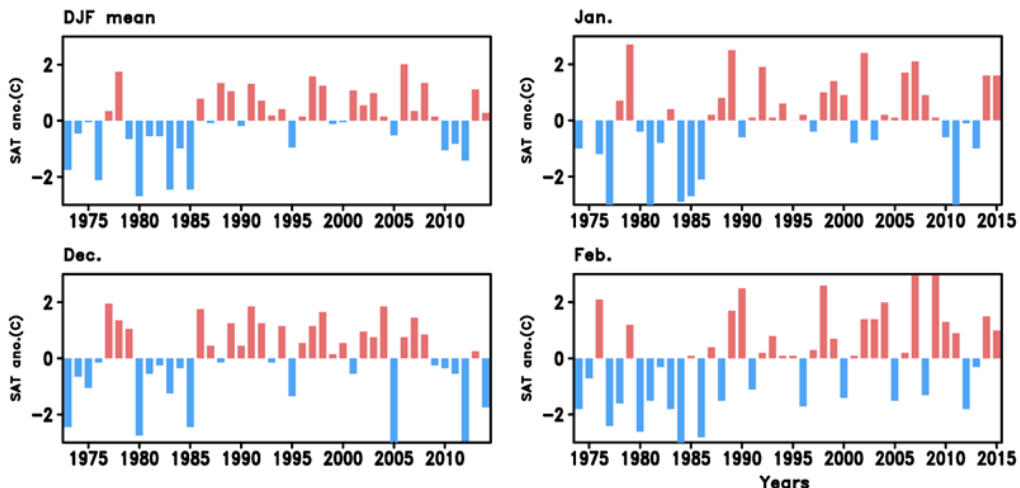


Figure 2.1 Time series of SAT averaged over the Korean Peninsula in the winter season (DJF), December (Dec.), January (Jan.) and February (Feb.)

예측인자 및 관련역학 분석을 위해 전 지구 관측 및 재분석 자료 또한 1973 ~ 2015 년 기간의 자료가 사용되었다. 특히 예측인자로 활용하기 위해 신뢰성뿐만 아니라 준 실시간으로 확보할 수 있는 자료를 사용하였다. 해수면온도(Sea surface temperature, SST) 자료는 NOAA ERSSTv4(Extended reconstructed Sea Surface Temperature version 4)를 사용하였고, 해빙자료의 경우에는 영국 해들리 센터에서 고해상도의 상세 해빙농도(Sea Ice Concentration, SIC) 자료를 제공하지만, 한 달 이상의 지연을 가지고 자료가 제공되므로 현업 예측 일정에 맞추어 자료 활용이 불가능하다. 따라서 준 실시간으로 확보 가능한 NCEP/NCAR Reanalysis 1(NCEP R1)의 해빙농도 자료를 사용하였고 해들리 해빙농도 자료와 비교 검증하였다. 눈덮임 자료는 본 연구의 분석기간인 1973년 이후의 장기간 자료가 확보가 가능하면서 준 실시간으로 제공 가능한 자료를 사용하기 위해 NOAA의 주 별(weekly) 눈덮임면적 자료 (Snowcover Extent, SCE)를 사용하였고 1997년 이후 생산된 고해상도 자료(IMS 24km)를 활용하여 비교하여 검증하였다.

예측인자와 기온 사이의 물리-역학적 관계 규명을 위해 기본적으로 필요한 대기 변수들은 NCEP R1 자료를 사용하였다(지상기온, 지위고도, 해면기압, 동서 및 남북 방향 바람, 연직속도). 1979년 이전의 NCEP R1 자료의 신뢰성에 대한 의문을 제기하고 있지만, 전반적으로 전 지구적인 기온 및 순환장의 평균과 변동 특성을 잘 잡아내고 있어(Kalnay and coauthor 1996; Liu et al. 2012; Woo et al. 2015b) 본 연구에서 사용하는데 무리가 없을 것으로 판단하였다. 뿐만 아니라 현업에서 예측인자로 활용하기 위해서 실시간 자료의 확보가 중요한데, NCEP R1 자료는 3일 이내의 준 실시간으로 자료 확보가 가능한 장점이 있어 본 연구에서 활용되었다. 열대 예측인자와 연관된 열대 대류활동의 변동을 조사하기 위한 자료로는 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR)을 활용하는 것이 맞지만 획득 가능한 기간이 짧아 상관성이 높은 강수자료를 활용하였다. 사용된 자료는 CMAP(CPC Mergeed Analysis Precipitation)과 GPCP(Global Precipitation Climatology Project) 이며, 1979년부터 존재하여 본 연구에서 강수와의 상관성 및 합성장은 모두 1979-2015년 자료를 사용한 것이다. 본 연구에 사용된 자료에 대한 정보는 표 2.1에 요약하였다.

Table 2.1 Data list used in this study

자료	변수	기간	비고
종관기상관측	자상기온	1973-2015	남한영역 45개지점
NCEP/NCAR Reanalysis I	자상기온 지위고도 해면기압 동서/남북방향 바람 연직속도(Omega) 해빙농도	1973-2015	
NOAA ERSSTv4	해수면온도	1973-2015	
HadISIC	해빙농도	1973-2015	NCEP/NCAR R1 해빙농도와 검증
NOAA SCE	주별 눈덮임	1973-2015	IMS 24km자료와 검증
GPCP & CMAP	강수	1979-2015	

2.2 연구 방법

앞서 서론에서 제시한 것처럼 본 연구의 목적은 현업에 활용 가능한 겨울철 월 별 (12월, 1월, 2월) 기온 통계예측 모델을 개발하는 것이다. 이를 위한 예측인자는 우리나라 월 별 기온과의 동시 및 지연상관성 분석(Correlation analysis)을 통하여 선정 되었다. 상관성 분석에 사용된 자료는 모두 분석 기간에 대한 선형 추세가 제거되었다. 예측인자 선정 과정에서 우리나라 기온과의 물리-역학적으로 연결고리가 있어야 하며 이러한 연결고리를 찾기 위해 예측인자와 연관된 물리-역학 변수들과의 상관성 분석 및 합성도 분석(Composite analysis)이 수행되었다. 상관성 및 합성도 분석은 Student T-test를 통해 90% 및 95%의 통계적 유의성 검증을 수행하였다.

월 별로 최종적으로 선정된 예측인자를 활용하여 월 별 다중선형 회귀(Multiple Linear Regression)를 통해 예측인자 별 기여도를 의미하는 회귀계수를 계산하였다.

$$SAT_{pred} = \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i \quad (3.1)$$

여기서 SAT_{pred} 는 예측된 지상기온 값을 의미하고, P_i 는 예측인자를 의미하며 λ_i 는 그 예측인자에 해당하는 회귀계수(Regression coefficient)를 나타낸다. i 와 N 은 각각 예측인자의 번호와 총 개수를 의미한다. 이 통계예측 모델은 교차검증(Cross validation)을 수행하여 그 안정성을 테스트 하였다.

3. 우리나라 겨울철 기온 변동과 연관된 기후감시인자

3.1 전 지구 대기순환장 및 기후요소(해수면온도, 해빙, 눈덮임)와의 동시상관성

우리나라 겨울철 기온 예측을 위해 지속적으로 감시해야하는 기후인자를 찾기 위해 월 별 기온과 다양한 기후인자들 사이의 동시상관성을 조사하였다. 그림 3.1.1은 상층 지위고도 및 해면기압과 동시상관성을 보여주는데, 서론에서 언급된 것처럼 우리나라 기온이 동아시아 겨울몬순과 깊게 연관되어 있음을 잘 보여준다. 대류권 상층에서는 우리나라 상공에 고기압성 편차가 존재하면, 다시 말해 기후학적으로 존재하는 동아시아 기압골이 약해지면 우리나라는 따뜻한 경향을 보인다. 이러한 상층 패턴과 함께 하층에서는 시베리아 고기압과 음의 상관성을, 알루산 저기압과는 양의 상관성이 강하게 나타난다. 특징적인 것은 시베리아 고기압이 발달하여 우리나라 북서쪽으로 확장하면 기온은 낮아지고 알루산 저기압이 발달하여 우리나라 동쪽으로 확장하면 기온이 평년보다 높은 경향이 있다. 이러한 특징은 겨울철 모든 월에서 뚜렷하게 나타난다.

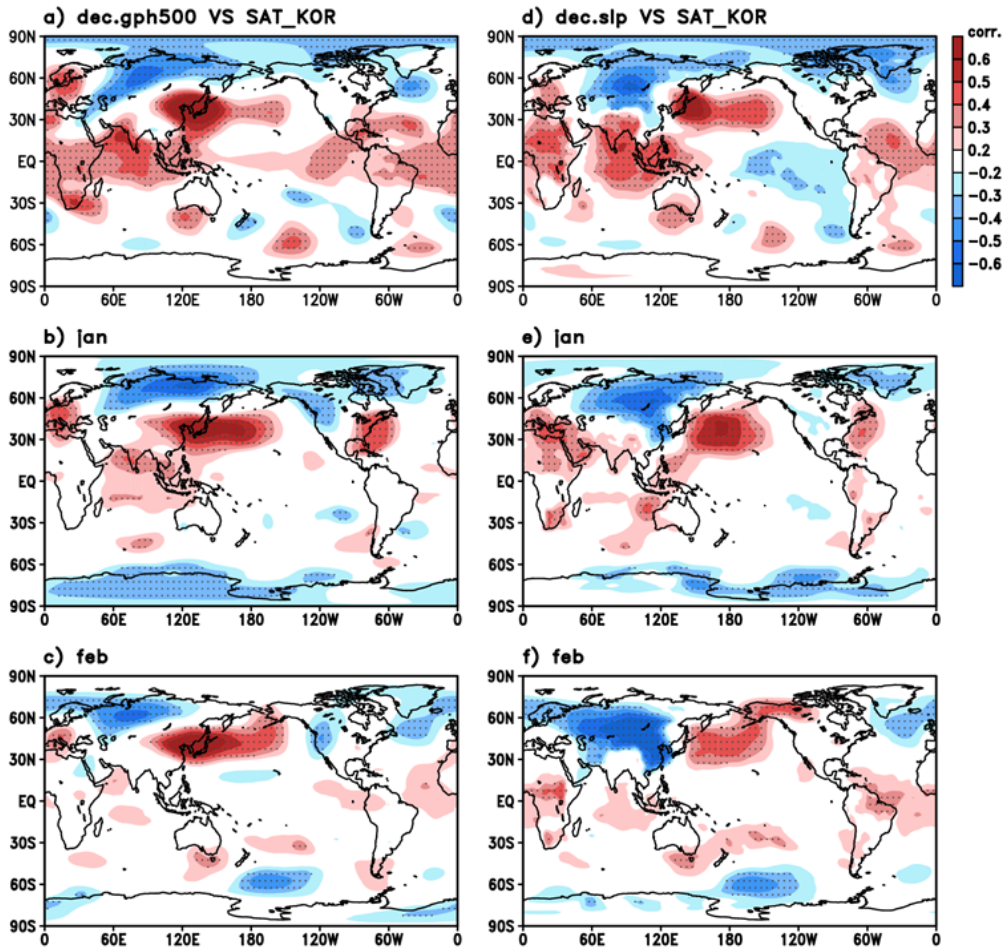


Figure 3.1.1 Correlation map between SAT in the KP and geopotential height at 500 hPa (Z500, Left column) and SLP (Right column) in Dec., Jan. and Feb. The black dots represent regions where is statistically significant at a 95% confidence level.

하지만 각 월 별로 우리나라 기온 변동에 영향을 미치는 원격상관(Teleconnection) 요소에는 다소 차이가 있음을 알 수 있다(Fig. 3.1.1). 12월과 1월의 경우 우리나라 기온은 전반적으로 북극지역의 상층 지위고도 및 해면기압과 음의 상관성을 보인다. 이것은 우리나라가 양(음)의 북극진동일 때 따뜻한(추운) 경향이 있는 기존 연구결과와 잘 일치한다(Thompson and Wallace 1998; Jeong et al 2015; Woo et al., 2012). 또 하나의 뚜렷한 특징은 우리나라 풍상측에 위치한 기압 패턴인데, 겨울철 우리나라 기온은 유럽에서 우랄 산맥을 거쳐 오는 파동형태의 순환장 분포와 상관성

이 높게 나타나며 특히, 12월과 1월에는 북시베리아 지역에서의 순환장과도 뚜렷한 음의 편차를 보여준다. 이는 우랄 산맥 및 북시베리아 지역의 블로킹과 같은 강한 고기압성 편차가 존재할 경우 우리나라는 추운 경향이 있음을 의미한다. 12월의 경우에는 극지역으로부터의 영향 이외에도 열대의 순환장과도 상관성이 나타남을 알 수 있다. 동태평양에 음의 상관성, 서태평양과 인도양에서 양의 상관성이 나타나는데 이로써 엘니뇨/라니냐가 우리나라 기온과 상관성이 있음을 알 수 있다.

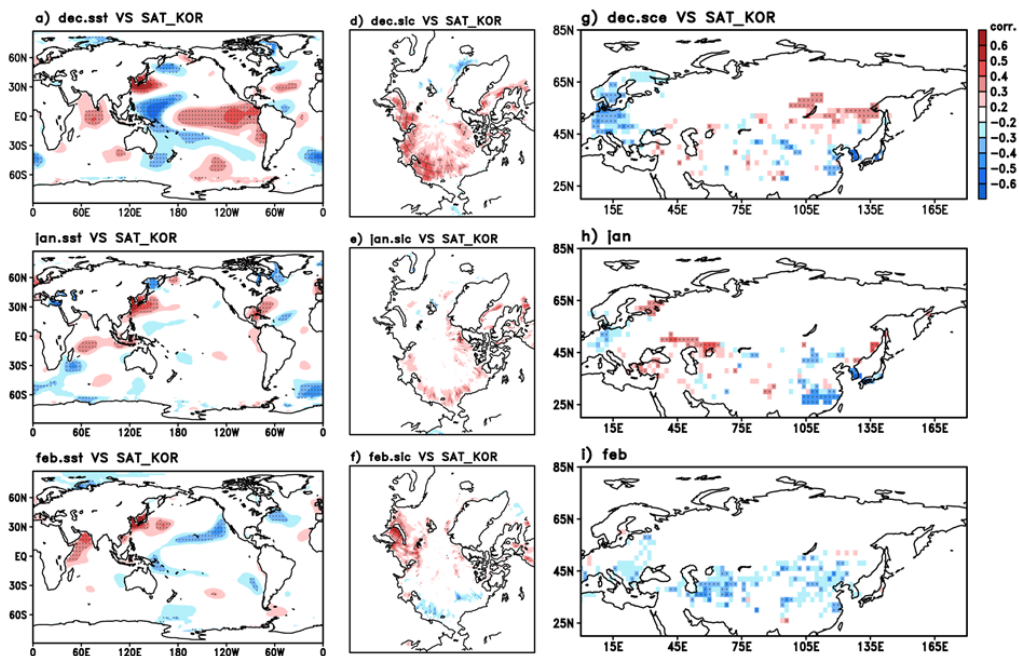


Figure 3.1.2 Correlation map between SAT in the KP and SST (Left column) SIC (Middle column) and SLP (Right column) in Dec., Jan., and Feb. The black dots represent regions where is statistically significant at a 95% confidence level.

이러한 순환장의 특징은 선행연구에 기반해 볼 때 해수면온도 및 북극 지역 빙권 요소들과의 연관성을 유추할 수 있다(Cheong et al. 2011; Cohen et al. 2007; Honda et al. 2009; Kim et al. 2014; Kim et al. 2014; Kug et al. 2015; Lee et al. 2006; Mori et al. 2014; Park and Ahn 2014; Son et al. 2014; Thompson and Wallace 1998;) 실제 해수면온도와 북극해빙 그리고 유라시아 눈덮임과의 동시 상관성을 조사한 결과(Fig. 3.1.2), 우리나라 12월 기온은 ENSO(El-Nino Southern

Oscillation) 및 북극해빙과 직접적인 연관이 있었다. 먼저 해수면온도와의 상관성을 살펴보면, 우리나라 12월 기온은 동태평양 해수면온도와 양의 상관, 서태평양과는 음의 상관성이 뚜렷하게 나타나 엘니뇨일 경우 따뜻한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 1월과 2월의 경우 열대 동태평양 해수면온도와의 상관성이 뚜렷하지 않았지만 2월의 경우 서태평양 지역에서는 약한 음의 상관성이 나타났다. 해빙과의 상관성은 12월과 2월에서 뚜렷하게 나타난다(Fig. 3.2). 12월에는 유라시아 대륙에 접해 있는 북극해(바렌츠 해 ~ 북시베리아 해)에서의 해빙과 강한 양의 상관성이 나타나고 2월에는 카라-바렌츠 해 해빙과 뚜렷한 양의 상관성을 보여준다. 최근 많은 선행 연구들이 겨울철 카라-바렌츠 해 해빙이 적은 것과 우랄 산맥 부근에서의 블로킹과 같은 양의 지위고도 편차가 발달하는 것이 서로 밀접하게 연관되어 있으며, 그 풍하층에 위치하는 동아시아는 음의 지위고도가 발달해 춥고 한파 발생 가능성이 증가함을 제시한 바 있다(Honda et al. 2009; Mori et al. 2014; Kug et al. 2015; Overland et al. 2015). 우리나라도 이러한 역학적 관계에 의해 바렌츠-카라 해 해빙과 동시상관성이 나타나는 것으로 판단된다. 유라시아 지역의 눈덮임에서도 통계적으로 유의한 동시상관성이 나타난다(Fig. 3.1.2). 특히 12월과 1월에는 전반적으로 서유럽 지역에 적은 눈, 중앙아시아에 많은 눈, 다시 동아시아에 눈이 적을 때 우리나라는 평년보다 따뜻한 경향을 보인다. 이는 유라시아 지역의 특정 눈덮임의 패턴이 우리나라 기온과 연관되어 있을 가능성을 의미하는데, 이러한 눈덮임 패턴은 순환장과도 연관되어 있는 것으로 생각된다. 12월과 1월의 상층 지위고도장(Fig. 3.1.1 a and b)과 눈덮임 면적(Fig. 3.1.2 g and h) 그림을 비교하면 고기압성 편차가 우세한 곳에는 눈이 적고 저기압성 편차가 위치하는 곳에서는 눈이 많은 특징이 잘 나타난다. 이러한 결과는 우리나라 기온과 유라시아 눈덮임 및 순환장과의 연관성이 있음을 제시할 뿐, 유라시아 지역의 특정 눈덮임 패턴이 순환장에 영향을 미쳐 우리나라에 영향을 주었다거나, 반대로 우리나라 기온 변동과 연관된 순환장 때문에 눈덮임에 영향을 주었는지를 설명해주지 않는다. 선행연구에 따르면 유라시아 대륙을 통과하는 파동형태의 순환장은 지면 조건을 포함하여 대기 상하층이 서로 상호작용하여 변동하는 것으로 알려져 있어(Takaya and Nakamura 2005) 상호작용의 가능성도 있다. 이에 대한 명확한 결과를 위해서는 물리·역학적 분석이나 역학 모델을 이용한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 저주파 변동(Low-frequency variability)과의 동시상관성

3.1절에서 제시된 것과 같이 우리나라 겨울철 기온 변동은 AO나 ENSO 등과 같은 전 지구(Global) 또는 반구(Hemispheric) 규모의 저주파(Low-frequency) 기후 변동에 영향을 받는다. 따라서 선행연구에 기반하여 우리나라 겨울철 기온 변동에 영향을 미칠 가능성이 있는 기후인자 및 저주파 변동성들과의 동시상관성을 조사하였다(Table 3.2.1). 동아시아 몬순을 직접적으로 표현하는 시베리아 고기압과 알루산 저기압의 변동이 우리나라 겨울철 기온 변동과 모든 월에서 강한 상관성을 보이는 것은 당연한 결과이다. 하지만 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 원격상관 패턴, 즉 대규모 기후모드에서도 상관성이 나타난다. AO는 우리나라 겨울 기온과 모든 월에서 통계적으로 유의한 상관성을 보여 우리나라 겨울 기온 변동을 설명하는데 매우 중요한 기후요소로 판단된다. 하지만 상관성은 크지 않고 우리나라 겨울 기온 변동의 약 10 ~ 15% 정도만 설명할 수 있다. 오히려 우랄 블로킹 지수와 우리나라 겨울 기온 사이에 더 크고 유의한 음의 상관성이 나타내는데 이는 우랄 산맥 부근의 순환장이 풍하층의 동아시아 기압골 발달 및 시베리아 고기압의 발달과 매우 밀접하게 연관되어 있기 때문이다(Mori et al. 2015, Takaya and Nakamura 2005; Cheong et al 2011). 이러한 유라시아 대륙의 기압계에 해빙의 변동이 영향을 미칠 수 있음이 최근 많이 제시되고 있고(Mori et al. 2014; Kug et al. 2015; Overland et al. 2015) 본 연구에서도 그러한 상관관계가 나타난다. 12월과 2월 우리나라 겨울 기온과 카라-바렌츠 해빙 사이의 상관성은 AO와의 상관성 보다 높아서 감시 및 예측인자로 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다. 우리나라 겨울 기온과 상관성이 뚜렷한 또 다른 기후인자는 WP(Western Pacific pattern)이다. WP는 북시베리아에서 캄차카반도 북쪽까지 영역에서 중심을 둔 기압과 그 남쪽에 위치한 우리나라와 일본을 포함하여 북서태평양 지역의 기압이 서로 다른 위상으로 변동하는 기후패턴을 말한다(3.3.4절에서 상세히 언급될 것임). 이 WP 패턴은 12월과 1월에 우리나라 기온과 뚜렷한 양의 상관성을 보이므로 WP가 양의 위상일 때 우리나라는 따뜻한 경향을 보임을 알 수 있다. 이 WP의 공간 패턴은 북시베리아 지역에 블로킹 형태의 고기압성 편차가 발달하였을 때, 그 남쪽에 저기압성 편차가 발달하여 우리나라 및 동아시아로 찬공기를 남하시키는 북고남저 형태(기상청 2016)의 패턴과 연관되어 있다. 따라서 북시베리아 지역 상층 지위고도 편차로 정의된 북시베리아 블로킹 지수와 우리나라 기온이 음의 상관성을

나타나는 것도 WP와 연관되어 있는 것 같다. 열대로 부터의 기후 인자도 상관성이 나타나는데 ENSO(Nino3.4 지수)의 경우에는 12월에 한정되어 상관성이 나타난다. 1월과 2월에는 PNA(Pacific North Atlantic pattern)와 높은 음의 상관성이 나타나지만 이는 PNA와 연관된 북태평양 지역에서의 변동이 알루산 저기압의 변동과 매우 밀접하게 연관되기 때문에 나타난 것으로 생각된다.

우리나라 기온 변동은 매우 다양한 기후인자 및 저주파 변동들과 상관성이 나타나지만 통계예측 모델에 예측인자로 활용하기 위해서는 자연상관성을 확보되어야 한다. 따라서 주요 기후모드 및 인자들은 예측인자로서 활용가능한지 진단이 필요하고, 사용하기 힘들 경우라도 높은 상관성을 보이는 요소일 경우 지속적인 모니터링을 통해 실태 진단 및 예측에 활용할 필요가 있다.

Table 3.2.1 Correlation coefficients between SAT in the KP and the indices of climate modes. Bold number is satisfied 95% significant level. Red(Blue) color indicates positive(negative) correlation

	AO	NAO	UB	SIC	SH	SAI	NSB	WP	AL	ENSO	PNA
12월	0.35	-0.02	-0.56	0.43	-0.58	-0.31	-0.39	0.46	0.32	0.39	-0.06
1월	0.41	0.21	-0.49	0.04	-0.59	-0.32	-0.50	0.49	0.50	0.14	-0.55
2월	0.31	0.10	-0.53	0.47	-0.78	-0.10	-0.14	0.13	0.46	0.09	-0.54

※ 기후모드 정의

1. AO, NAO(North Atlantic Oscillation), PNA(Pacific North Atlantic pattern), WP(Western Pacific pattern)
: From NOAA Climate Prediction Center
2. UB (Ural Blocking) : Z500 anomaly averaged over 60~100°E, 50~70°N (Cheung et al 2012; Wallace and Gutzler 1981)
3. SIC : Sea Ice Conc. anomaly averaged over the Barrents-Kara sea (60~100°E, 65~80°N)
4. SH (Siberian High) : Sea level pressure averaged over 80~120°E, 40~65°N (Gong et al. 2001 and so on)
5. SAI (Snow Advanced Index) : Difference snow cover extent over Eurasian Continent between 1st week and last week in October (modified the definition of SAI in Cohen et al. 2011)
6. AL (Aluetian Low) : Sea level pressure averaged over 160~220°E, 30~65°N
7. ENSO (El Niño-Southern Oscillation) : Nino 3.4 SST anomaly
8. NSB (Northern Siberian Blocking) : Z500 anomaly averaged over 120~150°E, 55~75°N

3.3 주요 기후인자 위상에 따른 우리나라 기온 경향

본 연구에서는 선행연구들과 상관성 분석에 기반해서 우리나라 기온과 직접적으로 연관된다고 판단되는 주요 기후감시인자를 선정하였다. 이 장에서는 기후감시인자들과 그 인자들이 우리나라 겨울 기온과 동시상관성이 나타나는 물리-역학적 이유를 정리하고, 실제 기후감시인자의 위상에 따른 우리나라 기온의 경향성을 검증하였다.

3.3.1 ENSO(El-Nino Southern Oscillation)

ENSO는 열대 중태평양에서 남미 해안에 이르는 지역에서 해수면온도의 변동과 그와 연관된 열대 태평양에서의 대기 순환의 변동을 통틀어 표현하는 말이다. 이러한 열대 태평양의 해수면온도와 순환장의 변화는 계절 내 규모 이상의 시간규모를 가지고 지속성을 가지며 나타난다. 강한 ENSO 양(음)의 위상은 엘니뇨(라니냐)를 의미하며, 일반적으로 여름철부터 이듬 해 봄철까지 열대 중동태평양에서는 해수면온도가 평년보다 높은(낮은) 상태가 지속되고 평년보다 워커순환이 약화(강화)된다. 이와 연관되어 중동태평양에서는 평년보다 상승기류(하강기류)가 강화되어 대류활동이 평년보다 증가(감소)하고 서태평양에서는 하강기류(상승기류)가 강화되어 대류활동이 평년보다 약화(강화)되는 특징을 보인다. 이러한 열대 대류활동의 변화는 파동의 원천(source)이 되고 중위도로 로스비(Rossby) 파동 형태의 패턴을 만들어 전 지구적인 기후와 날씨에 영향을 미친다.

그림 3.3.1은 엘니뇨 타입의 해수면온도 특성을 보일 때(Nino3.4 지수 $> +0.75$ 표준편차) 북반구 상층 지위고도 편차와 지상기온의 패턴을 보여준다. 잘 알려진 엘니뇨와 연관된 PNA-like 타입의 원격상관 패턴이 북태평양과 북미 지역에서 뚜렷하게 나타난다. 하지만 우리나라 주변에서는 12월에만 통계적으로 유의한 양의 지위고도 편차와 기온의 경향을 보여준다. Son 등(2014)은 엘니뇨가 발달한 12월에 서태평양 필리핀 해에서 강수가 감소(대류활동의 약화)하면 파동 전파를 통해 우리나라 동편 쿠로시오 해역을 중심으로 고기압성 편차가 발생함을 제시하였다. 이 쿠로시오 고기압은 대기 상하층에서 순압구조를 가지며 우리나라로 남풍계열 바람을 유도하여 우리나라는 기온이 높고 강수가 많은 경향을 보인다. 1월과 2월에도 우리나라 주변은

전반적으로 고기압성 편차가 나타나지만 통계적으로 유의하지 않고 북태평양과 북미 지역에서의 원격상관 패턴은 강해지는 특징을 보인다.

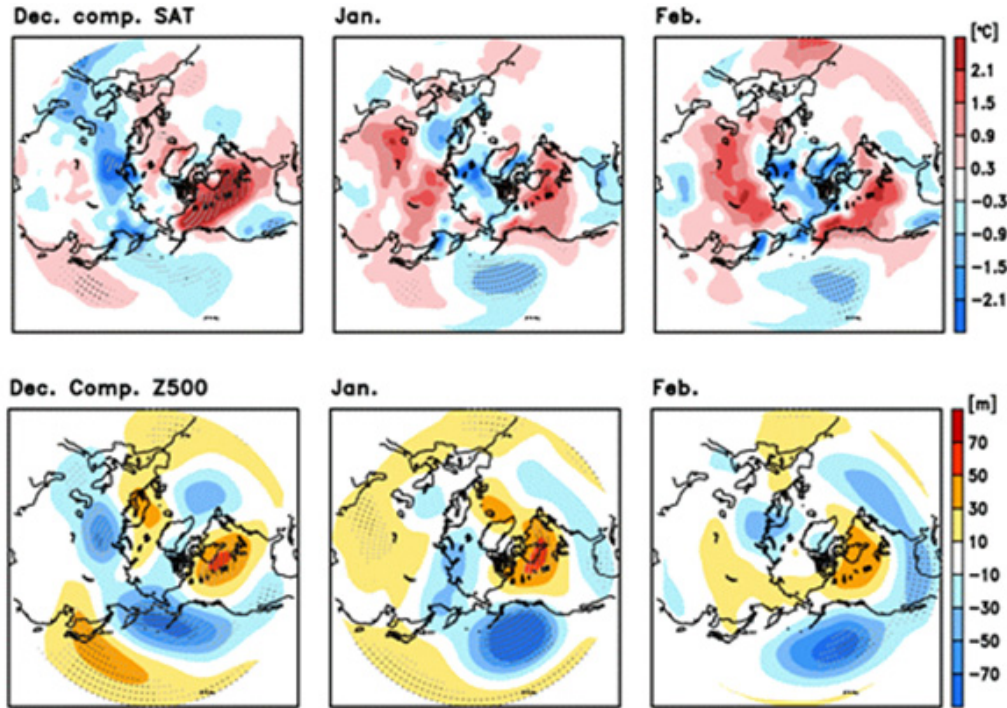


Figure 3.3.1 Composite map of the SAT (upper row) and geopotential height anomalies (lower row) over the northern hemisphere during the El-Niño (Nino3.4 SST ano. > 0.75 standard dev.). The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

라니냐의 경우에는 엘니뇨와 반대의 패턴이 나타나는 경향이 있지만 엘니뇨만큼 뚜렷하지 않다(Fig. 3.3.2). 12월의 경우에 엘니뇨와 반대로 우리나라와 일본에 저기압성 편차가 나타나지만 뚜렷하지 않고, 1월과 2월의 경우에는 우리나라 주변 순환장이나 기온에서 특정 경향이 보이지 않는다.

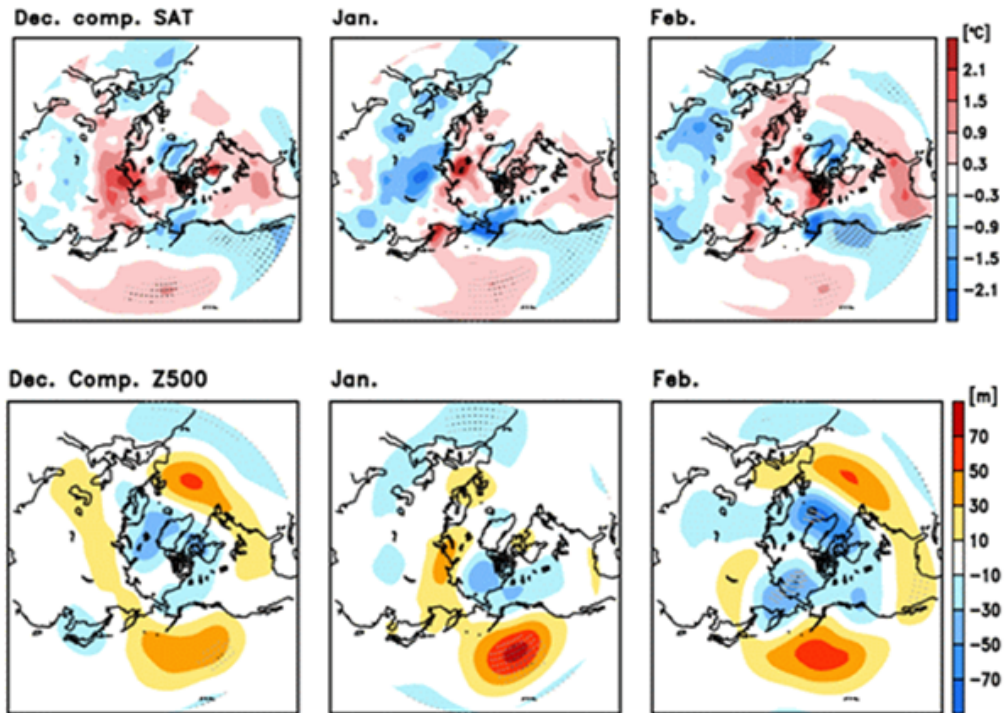


Figure 3.3.2 Same as Figure. 3.3.1 but for the La-Nina (Nino3.4 SST ano. < -0.75 standard dev.)

이러한 엘니뇨/라니냐 영향의 비대칭성의 원인은 최근 이슈가 되고 있는 엘니뇨 다양성 문제와 연관되어 있는 것 같다(Capotondi et al. 2015). 엘니뇨/라니냐는 각각의 이벤트마다 연관된 열대 태평양 지역 대류활동 패턴에서 차이가 있다. 그런데 엘니뇨 이벤트 내에서 적도 태평양 대류활동의 차이(Inter-El-Nino spread)가 많이 나는 지역은 동태평양이고 라니냐 이벤트 내에서의 대류활동이 차이(Inter-La-Nina spread)가 많이 나는 지역은 서태평양이다(Kim and Kug 2016). 다시 말해 겨울철 엘니뇨와 연관된 서태평양의 대류활동은 일정한 경향이 있지만 상대적으로 라니냐와 연관된 서태평양 대류활동은 라니냐 이벤트 마다 매우 다양하게 나타날 수 있다. 우리나라 겨울 기온은 서태평양 대류활동의 원격상관의 영향을 받는데 이러한 라니냐와 연관된 대류활동의 특성 때문에 엘니뇨 때에 비해 라니냐 때 일관적인 특성이 나타나지 않는 것으로 판단된다. 또 12월에만 ENSO의 영향이 뚜렷하고 1월과 2월에는 뚜렷하지 않은 것은 겨울 내에서 ENSO의 진행에 따른 서태평양과 동태평양의 대류 활동에도 그 크기와 위치에서 변동이 나타나기 때문으로 생각된다(Kim et al. 2015;

Son et al. 2014). ENSO와 연관된 서태평양과 동태평양의 대류활동은 우리나라와 일본 주변에서의 순환장에 서로 반대의 역할을 하는데 엘니뇨 때 12월에는 서태평양의 대류가 필리핀 해에 위치하고 대류의 억제가 강해 우리나라 주변 쿠로시오 고기압을 잘 만드는 반면, 1월과 2월에 서태평양 대류활동의 억제가 다소 약해지고 남하하는 반면 중동 태평양의 대류활동이 강하여 쿠로시오 고기압의 형태가 잘 나타나지 않기 때문에 생각된다(Kim et al. 2015; Son et al. 2014).

이러한 엘니뇨/라니냐 영향의 비대칭성은 ENSO 위상에 따른 우리나라 실제 기온 경향에서도 잘 나타난다. 엘니뇨 해 우리나라 겨울철 실제 기온을 살펴보면(Table 3.3.1), 12월에는 1)평년비슷 범위보다 낮은 사례는 없었고 절대 다수에서 양의 기온 편차를 나타낸다. 1월과 2월에도 양의 기온 편차가 우세하지만 12월만큼 뚜렷하지는 않다. 라니냐 해의 경우(Table 3.3.2)에 12월은 전반적으로 음의 기온 편차가 많고 1월과 2월에는 양과 음의 기온 편차가 비슷한 횟수로 나타나 라니냐의 영향으로 뚜렷한 기온의 경향성이 있다고 말하기 어려웠다.

Table 3.3.1 SAT anomalies over the KP in the month when Nino3.4 SST ano. > 0.75 std. The white boxes indicate the month when do not satisfied the criteria

+Nino3.4	12월	1월	2월	
1982/1983	-0.5	0.3	-1.9	
1986/1987	1.5	0.1	0.3	
1987/1988	0.2	0.7	-1.6	
1991/1992	1.6	1.8	0.1	
1994/1995	0.9	-0.1	0.0	
1997/1998	0.9	0.9	2.5	평년비슷 범위 이상 양의 편차
2002/2003	0.7	-0.8	1.3	평년비슷 범위 이내 양의 편차
2006/2007	0.5	2.0	3.1	평년비슷 범위 이내 음의 편차
2009/0010	-0.5	-0.7	1.2	평년비슷 범위 이하 음의 편차

1) 우리나라 기상청은 평년기간 1981-2010년의 정의하고 관측 및 여러 기상/기후 변수들의 기후값(Climatology)을 이 기간의 평균으로 정의하고 있다. 확률 장기예보(계절예측) 시행에 따라 우리나라 기온 및 강수에 대해 이 평년기간 동안의 변동성을 고려하여 평년비슷 범위 구간을 설정하여 예보에 활용하고 있다. (12월, 1월 및 2월의 평년비슷 범위 구간은 각각 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 및 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 이다.

Table 3.3.2 Same as Table 3.3.1 except for the Nino3.4 SST ano. $\langle -0.75$ std.

-Nino3.4	12월	1월	2월		
1973/1974	-2.7	-1.1	-1.9		
1975/1976	-1.3	-1.3	2.0		
1984/1985	-0.6	-2.8	0.0		
1988/1989	-0.4	2.4	1.6		
1995/1996	-1.6	0.1	-1.8		
1998/1999	1.4	1.3	0.6		
1999/2000	-0.1	0.8	-1.5		
2005/2006	-3.7	1.6	0.1		
2007/2008	1.2	0.8	-1.4		평년비슷 범위 이상 양의 편차
2008/2009	0.6	0.0	3.0		평년비슷 범위 이내 양의 편차
2010/2011	-0.6	-3.8	0.8		평년비슷 범위 이내 음의 편차
2011/2012	-0.8	-0.2	-1.9		평년비슷 범위 이하 음의 편차

3.3.2 AO(Arctic Oscillation)

AO는 북반구 극지역과 중위도 지역의 해면기압 또는 지위고도 편차가 서로 반대의 부호를 가지면서 진동하며 현상을 말한다. AO는 북반구 20°N 이상 해면기압 편차를 EOF(Empirical Orthogonal Function)의 첫 번째 모드로 정의되고 북반구 전체 해면기압 변동의 약 20%를 설명한다고 알려져 있다(Thompson and Wallace 1998). AO는 연직으로 순압적 구조를 가지고 있고 북반구 중위도 제트기류의 변동 및 동아시아 몬순 시스템과 연관되어 있어 동아시아를 포함하는 유라시아 대륙의 기온과 깊게 연관되어 있다(Fig. 3.3.3; Gong et al. 2002; Jeong et al. 2005; Kim and Ahn 2012; Thompson and Wallace 1998; Woo et al. 2012).

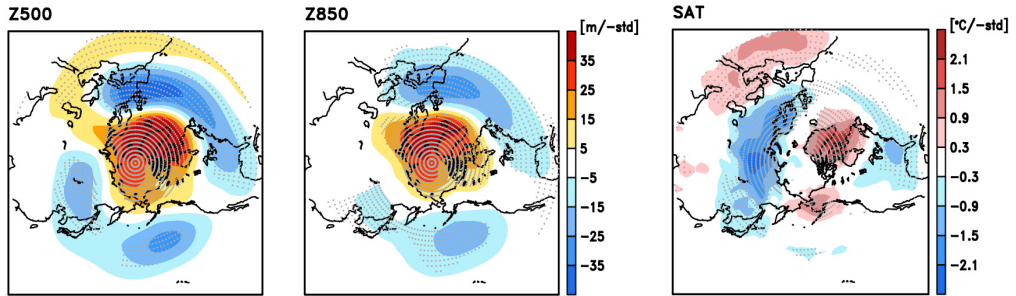


Figure 3.3.3 SAT(Right) and geopotential heights anomaly at 500 hPa(Left) and 850 hPa(Middle) regressed on the seasonal mean AO index during the winter season of 1973~2015. The gray dots represent regions where is statistically significant at a 95% confidence level.

그림 3.3.4는 양의 AO가 강할 때(AO 지수 $> +0.75$ standard dev.) 겨울철 각 월의 지상기온과 상층 지위고도 편차를 보여준다. AO의 정의에서처럼 북극지역은 음의 지위고도 편차가 지배하고 있고 동아시아 및 우리나라를 포함한 중위도 지역에서는 양의 편차가 뚜렷하다. 우리나라 상공의 양의 지위고도 편차는 기후학적 동아시아 기압골의 약화 및 동아시아 몬순의 약화를 의미할 수 있으며, 따라서 우리나라를 포함한 동아시아 지역에서 양의 지상기온 편차가 뚜렷하다. 월 별로 공간적인 패턴에 다소의 차이가 있지만 전반적인 특징은 매우 비슷하다. AO의 위상이 음으로 강할 때의 패턴(Fig 3.3.5)은 양의 위상일 때와 대칭적인 특성이 잘 보인다. 모든 월에서 동아시아 지역 상층에 음의 지위고도 편차가 나타나고 지상기온은 평년보다 낮은 경향을 보인다.

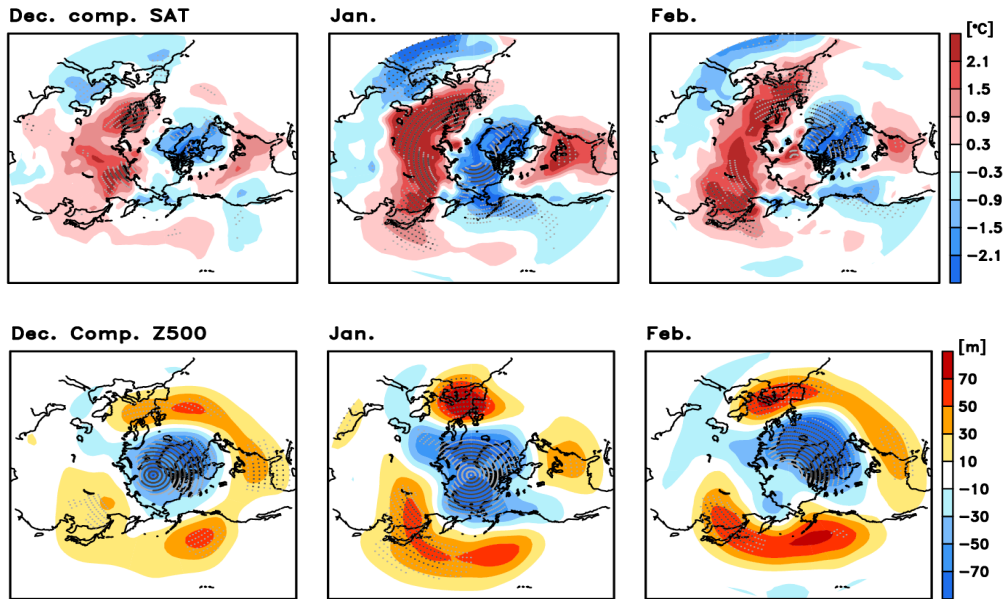


Figure 3.3.4 Composite map of the SAT (upper row) and geopotential height anomalies (lower row) over the northern hemisphere during the positive phase of AO (AO index $> +0.75$ standard dev.) The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

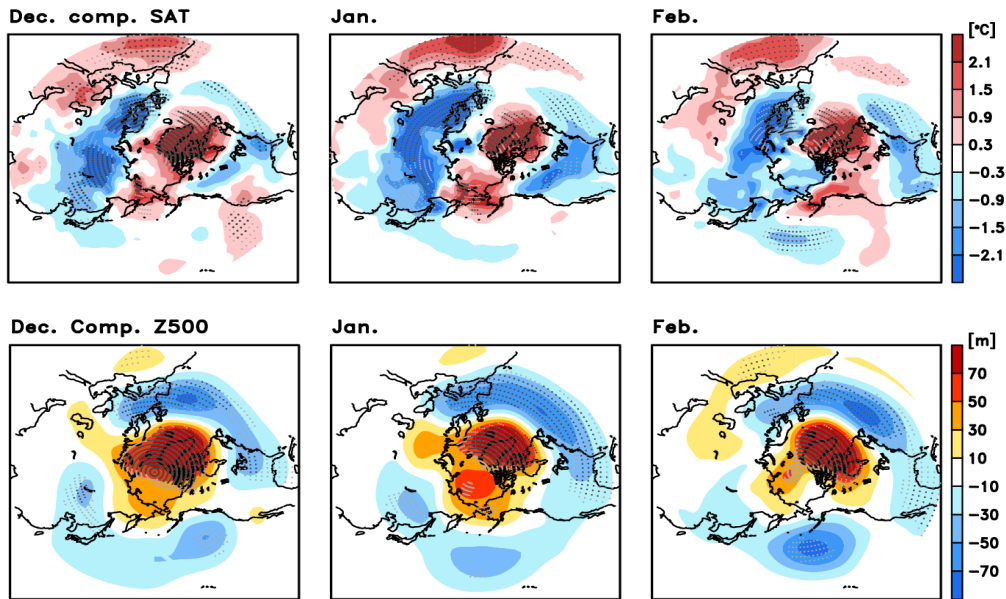


Figure 3.3.5 Same as Figure. 3.3.4 but for the negative phase of AO (AO index < -0.75 standard dev.)

실제 AO 위상에 따른 우리나라 기온의 경향을 살펴보면, 양의 AO가 강할 때에는 우리나라 겨울철 기온이 높았던 사례가 대다수이며 겨울철 모든 월에서 따뜻한 경향성이 나타난다(Table 3.3.3). 음의 AO가 강할 때에는 평년보다 낮은 기온을 보이는 경우가 다수이지만 1월과 2월에 양의 기온 편차를 보인 경우도 빈번하여 양의 AO에 비해 경향성이 뚜렷하지는 않은 특징이 있다(Table 3.3.4).

Table 3.3.3 SAT anomalies over the Korean Peninsula in the month when AO index $> +0.75$ std. The white boxes indicate the month when is not satisfied the criteria

+AO	12월	1월	2월		
1974/1975	-0.9	-0.1	-0.8		
1975/1976	-1.3	-1.3	2.0		
1979/1980	0.8	-0.5	-2.7		
1982/1983	-0.5	0.3	-1.9		
1988/1989	-0.4	2.4	1.6		
1989/1990	1.0	-0.7	2.4		
1990/1991	0.2	0.0	-1.2		
1991/1992	1.6	1.8	0.1		
1992/1993	1.0	0.0	0.7		
1994/1995	0.9	-0.1	0.0		
1996/1997	0.3	-0.5	0.2		
1998/1999	1.4	1.3	0.6		
1999/2000	-0.1	0.8	-1.5		
2001/2002	-0.8	2.3	1.3		
2004/2005	1.6	0.0	-1.6		
2006/2007	0.5	2.0	3.1		평년비슷 범위 이상 양의 편차
2010/2011	-0.6	-3.8	0.8		평년비슷 범위 이내 양의 편차
2011/2012	-0.8	-0.2	-1.9		평년비슷 범위 이내 음의 편차
2013/2014	0.0	1.5	1.4		평년비슷 범위 이하 음의 편차

Table 3.3.4 Same as Table 3.3.3 except for the AO index < -0.75 std.

-AO	12월	1월	2월	
1976/1977	-0.4	-3.9	-2.5	
1977/1978	1.7	0.6	-1.7	
1978/1979	1.1	2.6	1.1	
1979/1980	0.8	-0.5	-2.7	
1981/1982	-0.8	-0.9	-0.4	
1982/1983	-0.5	0.3	-1.9	
1984/1985	-0.6	-2.8	0.0	
1985/1986	-2.7	-2.2	-2.9	
1986/1987	1.5	0.1	0.3	
1995/1996	-1.6	0.1	-1.8	
1996/1997	0.3	-0.5	0.2	
1997/1998	0.9	0.9	2.5	
2000/2001	0.3	-0.9	0.0	
2001/2002	-0.8	2.3	1.3	
2002/2003	0.7	-0.8	1.3	
2003/2004	0.5	0.1	1.9	
2004/2005	1.6	0.0	-1.6	
2005/2006	-3.7	1.6	0.1	
2006/2007	0.5	2.0	3.1	평년비슷 범위 이상 양의 편차
2009/2010	-0.5	-0.7	1.2	평년비슷 범위 이내 양의 편차
2010/2011	-0.6	-3.8	0.8	평년비슷 범위 이내 음의 편차
2012/2013	-3.2	-1.1	-0.4	평년비슷 범위 이하 음의 편차

AO는 겨울철 모든 월에서 우리나라 기온과 통계적으로 유의한 상관성이 나타나지만 자연변동성의 특성이 강해 계절 내 시간 규모에서조차 예측이 매우 힘든 것으로 알려져 있다. 그렇지만 지속적으로 모니터링하여 실황 진단 및 기후 분석에 활용할 필요가 있다. 뿐만 아니라 최근 유라시아 눈덮임 정보를 활용하여 겨울철 평균 AO를 예측성을 높일 수 있음을 제시한 연구가 있고(Cohen et al. 2011 Kryjov and Min 2016), 역학모델을 이용하여 겨울철 평균 AO의 예측성 향상에 대한 연구가 보고되고 있어 우리나라 겨울철 기온 예측에 정보로 활용 가능성도 있다(Ahn and Kim 2014; Kim and Ahn 2015; Riddle et al. 2013).

3.3.3 카라-바렌츠 해 해빙

가을 ~ 겨울철 북극 해빙면적은 1990년대 중반 이후로 꾸준히 감소하고 있으며 2000년대 들어 그 감소 추세는 급격해졌다. 특히 카라-바렌츠 해 해빙의 감소는 풍하측에 위치한 시베리아와 동아시아 지역의 순환장에 영향을 미칠 수 있어(Honda et al. 2009; Mori et al. 2014; Kug et al. 2015) 우리나라 겨울철 기후감시 및 예측에 중요한 기후인자 중 하나이다.

카라-바렌츠 해 해빙농도에 따른 순환장 및 기온 특성을 살펴보기 위해 카라-바렌츠 해빙농도 지수를 $60 \sim 100^{\circ}\text{E}$, $65 \sim 80^{\circ}\text{N}$ 영역에서 평균된 해빙농도 편차로 정의하였다. 그림 3.3.6은 카라-바렌츠 해 해빙이 적을 때(카라-바렌츠 해빙지수 < -0.75 standard dev.)의 해빙, 지상기온 및 상층 지위고도 편차 합성도를 보여준다. 12월과 2월에 상층 순환장에서 가장 두드러진 특징은 카라-바렌츠 해 보다 다소 남쪽의 우랄 산맥 부근에서 고기압성(양의 지위고도) 편차가 블로킹처럼 강하게 발달하는 것이다. 그 풍하측인 시베리아와 동아시아 지역에는 저기압성(음의 지위고도) 순환이 발달하여 동아시아 상층 기압골이 깊어지고 하층의 대륙고기압이 발달한다. 이러한 순환장의 구조는 하층 북풍계열 바람을 강화시켜 동아시아와 우리나라에는 평년보다 낮은 기온이 뚜렷하다. 하지만 1월의 경우, 우랄 산맥 부근 양의 지위고도 편차는 발달하는 경향을 보이지만 풍하측에는 저기압성 편차가 나타나지 않고 오히려 양의 지위고도와 양의 기온 편차가 나타나는 경향(통계적으로 유의하지 않음)이 있었다. 이러한 특징은 12월과 2월에 비해 1월의 해빙(Fig 3.3.6)이 다소 덜 녹아 있고, 녹은 면적도 좁아서 우랄 산맥 부근의 고기압성 편차도 약했던 것이 원인 중 하나일 가능성이 있다. 하지만 겨울철동안 1월에만 이러한 특징이 나타나는 명확한 원인을 밝히기 위해서는 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

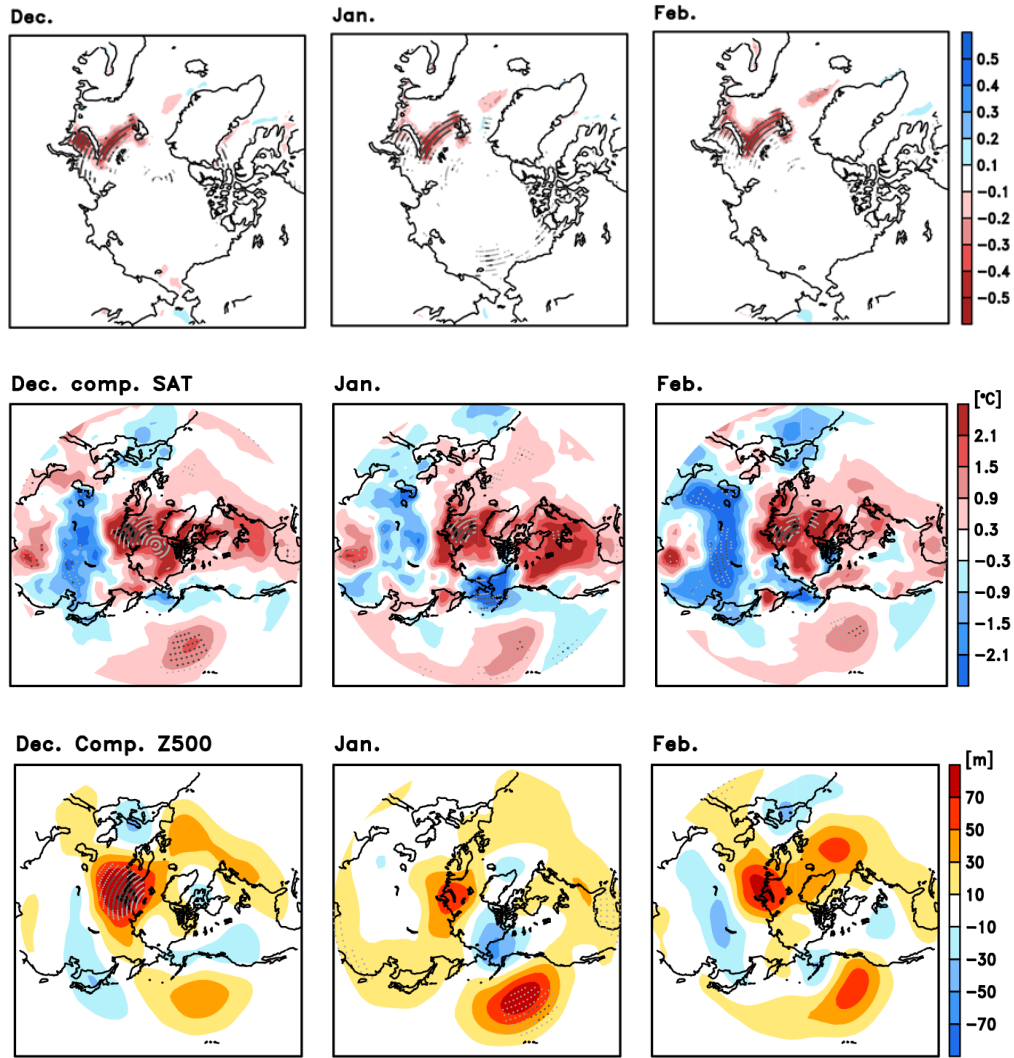


Figure 3.3.6 Composite map of the Sea ice concentration(SIC, upper row), SAT (middler row) and geopotential height anomalies (lower row) over the northern hemisphere during the month with the less SIC over the Kara-Barents sea (SIC_Kara-Barents index $> +0.75$ standard dev.) The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

겨울철 카라-바렌츠 해 해빙이 적은 해 우리나라 기온의 현황을 살펴보면(Table 3.3.5), 12월과 2월에 다수의 해에서 평년비슷 범위보다 낮은 기온을 기록하였다. 하지만 1월에는 순환장 패턴에서처럼 해빙이 많이 녹았음에도 오히려 양의 기온 편차뿐만 아니라 평년비슷 범위보다 높은 기온을 기록한 해가 많아 1월 기온과 카라-바렌츠 해 해빙의 동시상관성을 연결하기는 힘들 것으로 판단된다.

Table 3.3.5 SAT anomalies over the Korean Peninsula in the month when SIC_Kara-Barens index < -0.75 std. The white boxes indicate the month when is not satisfied the criteria

-SIC	12월	1월	2월		
2001/2002	-0.8	2.3	1.3		
2004/2005	1.6	0.0	-1.6		
2005/2006	-3.7	1.6	0.1		
2006/2007	0.5	2.0	3.1		
2007/2008	1.2	0.8	-1.4		
2008/2009	0.6	0.0	3.0		평년비슷 범위 이상 양의 편차
2011/2012	-0.8	-0.2	-1.9		평년비슷 범위 이내 양의 편차
2012/2013	-3.2	-1.1	-0.4		평년비슷 범위 이내 음의 편차
2013/2014	0.0	1.5	1.4		평년비슷 범위 이하 음의 편차

3.3.4 WP(Western Pacific pattern)

WP는 북태평양 부근의 캄차카 및 북시베리아 지역에서의 순환장과 그 남쪽에 위치한 우리나라와 일본을 포함하여 북서태평양 지역에서의 순환장이 서로 다른 위상으로 진동하는 패턴으로 알려져 있다(Branston and Livezey 1987; Wallace and Gutzler 1981). WP 지수는 155°E, 60°N에서의 500 hPa 지위고도 편차와 155°E, 30°N에서의 편차의 차를 1/2로 나눈 값으로 정의되었다(Wallace and Gutzler 1981). WP 패턴은 사계절 중 겨울철 변동이 가장 강하며 동아시아 제트의 위치 및 강도와 상관성이 높기 때문에 동아시아 몬순과도 연관성이 높다(Fig. 3.3.7; Park and Ahn 2016). 따라서 우리나라 기온과도 12월과 1월에 높은 양의 상관성이 나타난다(Table 3.2.1).

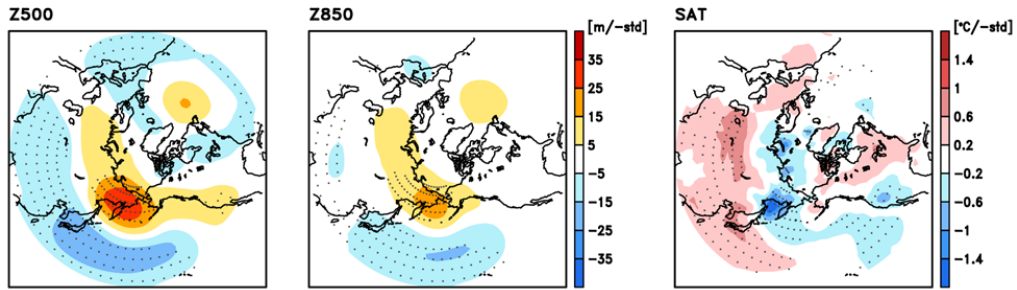


Figure 3.3.7 SAT(Right) and geopotential heights anomaly at 500 hPa(Left) and 850 hPa(Middle) regressed on the seasonal mean WP index during the winter season of 1973~2015. The gray dots represent regions where is statistically significant at a 95% confidence level.

WP 패턴이 양의 위상으로 강할 때 (WP 지수 $> +0.75$ standard dev.)의 지상기온과 순환장의 합성장을 살펴보면(Fig. 3.3.8) 겨울철동안 모든 월에서 캄차카 반도 부근에서의 저기압성 편차, 그 남쪽인 일본과 우리나라 동쪽에 중심을 둔 고기압성 편차가 뚜렷하다. 중위도 순환장 편차의 중심이 우리나라 동쪽에 위치하고 있기 때문에 통계적으로 유의한 기온 편차도 일본과 그 동쪽에서 나타나지만, 12월과 1월에는 우리나라를 포함한 극동아시아 지역에서의 양의 기온 편차가 뚜렷한 경향이 있다. 반대로 음의 WP 위상이 강할 때에는(WP 지수 < -0.75 standard dev.) WP 패턴이 양의 위상일 때 순환장과 북태평양 영역에서 대칭적인 패턴을 보여준다. 따라서 12월과 1월에는 음의 기온 편차가 통계적으로 유의하면서 뚜렷하게 나타난다. 하지만 2월의 WP 패턴은 양과 음의 위상 모두에서 중위도 편차의 중심이 12월과 1월에 비해 남동쪽으로 치우쳐 발달하는 경향이 있어, 우리나라에는 그 영향이 다소 약해 뚜렷한 기온 편차의 경향이 나타나지 않는다.

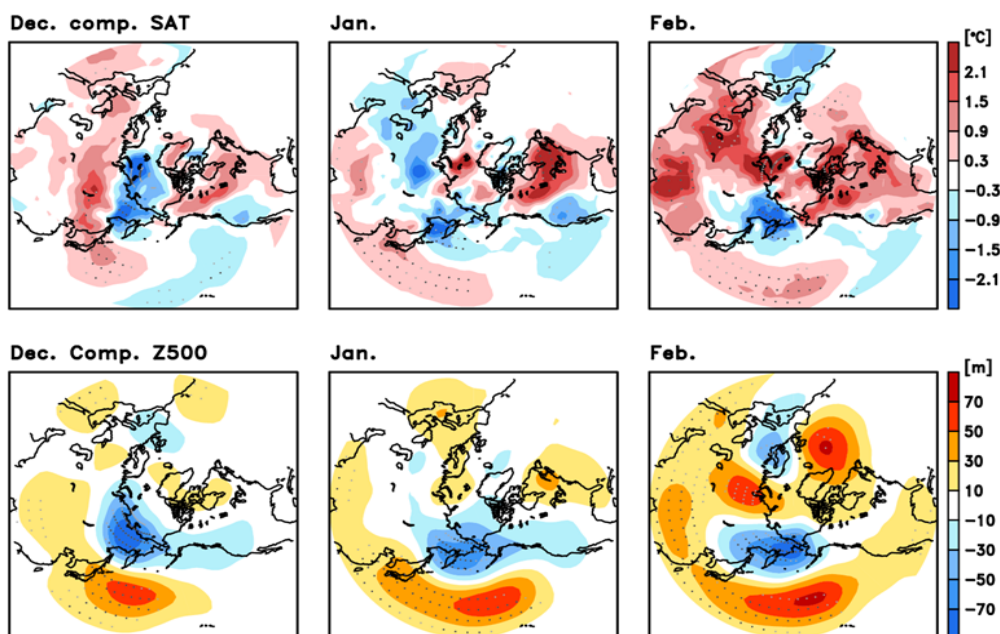


Figure 3.3.8 Composite map of the SAT (upper row) and geopotential height anomalies (lower row) over the northern hemisphere during the positive phase of WP (WP index > +0.75 standard dev.). The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

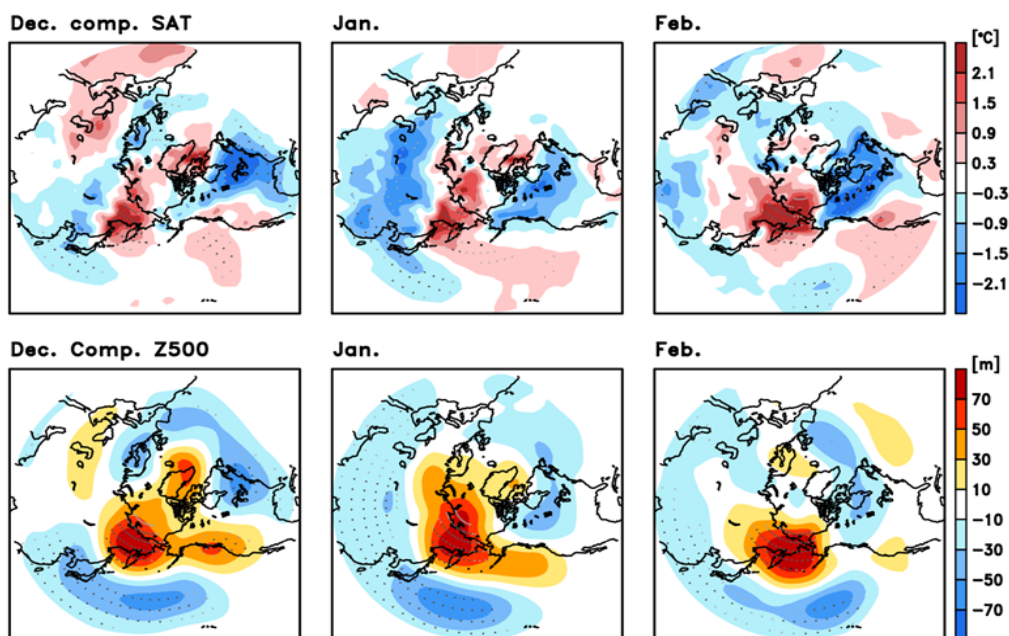


Figure 3.3.9 Same as Figure. 3.3.8 but for the negative phase of WP (WP index < -0.75 standard dev.)

이러한 특징은 실제 우리나라 관측 지상기온의 경향성에서도 뚜렷하게 나타난다. WP 패턴이 양의 위상일 때(Table 3.3.6), 겨울철 전반적으로 양의 기온 편차가 뚜렷하지만 12월과 1월에 그 경향이 더욱 뚜렷하다. 특히 12월과 1월에는 평년비슷 범위 보다 추운 경우는 한 사례도 없었다. 반대로 음의 위상일 때에도 우리나라는 음의 기온 편차가 12월과 1월에 압도적으로 많아 양의 위상과 뚜렷한 반대의 경향을 보여 주었다.

Table 3.3.6 SAT anomalies over the KP in the month when WP index $> +0.75$ std. The white boxes indicate the month when is not satisfied the criteria

+WP	12월	1월	2월		
1978/1979	1.1	2.6	1.1		
1982/1983	-0.5	0.3	-1.9		
1986/1987	1.5	0.1	0.3		
1987/1988	0.2	0.7	-1.6		
1988/1989	-0.4	2.4	1.6		
1989/1990	1.0	-0.7	2.4		
1990/1991	0.2	0.0	-1.2		
1993/1994	-0.4	0.5	0.0		
1997/1998	0.9	0.9	2.5		
1998/1999	1.4	1.3	0.6		
2000/2001	0.3	-0.9	0.0		
2001/2002	-0.8	2.3	1.3		
2003/2004	0.5	0.1	1.9		
2005/2006	-3.7	1.6	0.1		
2006/2007	0.5	2.0	3.1		
2007/2008	1.2	0.8	-1.4		평년비슷 범위 이상 양의 편차
2008/2009	0.6	0.0	3.0		평년비슷 범위 이내 양의 편차
2011/2012	-0.8	-0.2	-1.9		평년비슷 범위 이내 음의 편차
2012/2013	-3.2	-1.1	-0.4		평년비슷 범위 이하 음의 편차

Table 3.3.7 Same as Table 3.3.6 except for the WP index < -0.75 std.

-WP	12월	1월	2월	
1973/1974	-2.7	-1.1	-1.9	
1974/1975	-0.9	-0.1	-0.8	
1975/1976	-1.3	-1.3	2.0	
1976/1977	-0.4	-3.9	-2.5	
1979/1980	0.8	-0.5	-2.7	
1981/1982	-0.8	-0.9	-0.4	
1982/1983	-0.5	0.3	-1.9	
1983/1984	-1.5	-3.0	-3.3	
1984/1985	-0.6	-2.8	0.0	
1985/1986	-2.7	-2.2	-2.9	
1989/1990	1.0	-0.7	2.4	
1990/1991	0.2	0.0	-1.2	
1991/1992	1.6	1.8	0.1	
1993/1994	-0.4	0.5	0.0	
1994/1995	0.9	-0.1	0.0	
1995/1996	-1.6	0.1	-1.8	
1996/1997	0.3	-0.5	0.2	
1999/2000	-0.1	0.8	-1.5	
2003/2004	0.5	0.1	1.9	
2005/2006	-3.7	1.6	0.1	
2009/2010	-0.5	-0.7	1.2	
2010/2011	-0.6	-3.8	0.8	평년비슷 범위 이상 양의 편차
2011/2012	-0.8	-0.2	-1.9	평년비슷 범위 이내 양의 편차
2013/2014	0.0	1.5	1.4	평년비슷 범위 이내 음의 편차
2014/2015	2.0	1.5	0.9	평년비슷 범위 이하 음의 편차

앞서 보여드린 WP 패턴과 우리나라 겨울 기온 사이의 뚜렷한 상관성으로 볼 때, WP 패턴은 겨울철 기온과 연관되어 지속적으로 감시되어야 할 것으로 판단된다. 하지만 표 3.3.6와 3.3.7에서 추정할 수 있듯이 WP 패턴은 특정 위상이 계절 내 규모에서 지속되지 않고 변동이 매우 크다. 또한 AO와 같이 매우 다양한 기후인자들과

연관되어 있어 예측이 힘들고 예측인자로 직접 활용하기도 어렵다. 그렇지만 WP 지수와 10월 해빙농도 사이의 상관성 그림 (Fig. 3.3.10)을 보면 WP 패턴은 늦여름-가을철 카라 해와 랍테프 해(특히, 타미르 반도 동편)의 해빙과 자연상관성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 특정 지역에서의 해빙농도가 시간 지연을 가지고 WP와 연관된 순환장을 통해 우리나라에 영향을 미칠 가능성이 있음을 의미한다. 실제 9월 카라-랍테프 해 및 10월 랍테프 해 해빙농도 편차는 12월 우리나라 기온과 높은 자연상관성을 보여 예측인자로 활용가능한데 이는 4.1.1절에서 상세히 기술할 것이다.

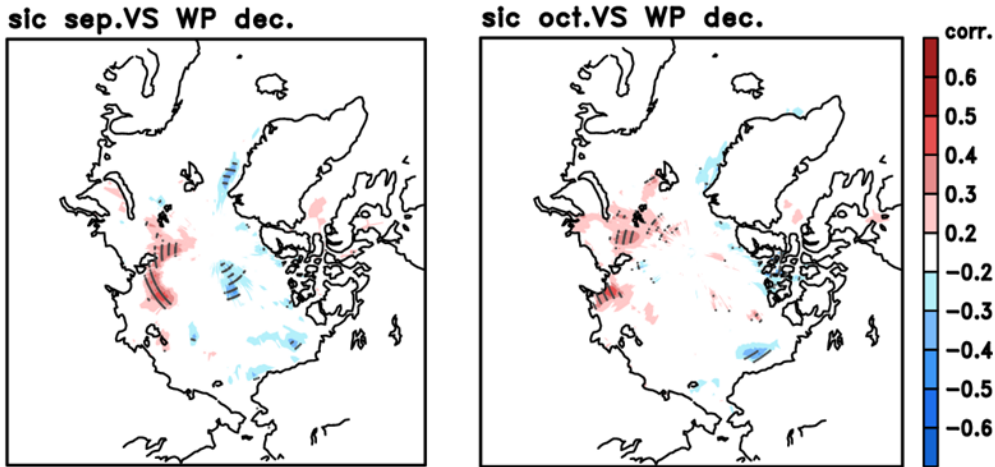


Figure 3.3.10 Lag-correlation map between WP index in December and SIC over the Arctic in September & October. The black dots represent regions where is statistically significant at a 95% confidence level.

지금까지 3.3절에서는 겨울철 우리나라 월 별 기온과 다양한 기후인자와의 동시상관성에 기반하여 기후감시인자를 제시하였다. 앞서 제시한 바와 같이 각각의 기후인자들은 우리나라 기온과 월 별로 서로 다른 상관성을 보여준다. 이는 겨울철 우리나라 기온 변동을 많이 설명할 수 있는 기후인자가 월 별로 차이가 있음을 의미한다. 12월의 기온의 경우 ENSO, AO, WP, 카라-바렌츠 해빙 모두와 통계적으로 유의하고 비슷한 크기의 상관성이 나타나 모든 요소에 대해 지속적 감시가 필요할 것으로 판단된다. 1월의 경우에는 AO와 WP 패턴에서 통계적으로 유의한 상관성이 나타난

다. 특히, WP 패턴은 0.49의 높은 상관성을 보이고 실제 우리나라 기온에서도 양의 상관 경향이 뚜렷하여 중요한 감시인자로 판단된다. 2월의 경우에는 카라-바렌츠 해빙에서 0.47의 뚜렷한 양의 상관성이 나타나 이 지역에서의 해빙이 얼마나 덜 얼어붙는지 감시할 필요가 있다.

이러한 우리나라 겨울 기온과 기후 감시인자 사이의 상관성은 장기적으로 변동할 가능성이 있다. 선행연구 결과에 따르면 ENSO와 동아시아 겨울몬순 사이의 상관성은 PDO 위상에 따라 그 상관관계가 변하고 있으며 최근 ENSO와 동아시아 겨울몬순 사이의 상관성이 증가하는 것으로 보고되고 있다(He and Wang 2013). 이러한 상관성의 장기 변동은 우리나라 겨울 기온과 연관된 기후인자가 변하거나 기후인자의 기여도가 기간에 따라 다를 수 있음을 의미한다. 따라서 상관성의 장기 변동성에 대한 연구를 통해 이해를 높이고 이를 바탕으로 감시인자를 현업에 활용할 필요가 있다. 뿐만 아니라 지속적으로 우리나라 겨울 기온의 변동과 연관된 기후인자를 발굴할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 우리나라 겨울철 기온 예측인자 및 통계예측 모델 구축

본 연구의 목적은 우리나라 겨울철 기온과 물리-역학적으로 연결고리를 가진 예측인자에 기반하여 월 별 기온 통계예측 모델을 구축하고 현업에 활용하는 것이다. 따라서 예측인자 선정을 위해 현업 계절예측 정보 생산 일정과 그 일정에 따른 예측인자 자료 확보의 가능여부를 고려하여, 겨울철 각 월의 기온과 10월 이전의 해빙농도, 해수면온도, 눈덮임면적 자료 등과의 지연상관성을 조사하였다. 통계적으로 유의한 지연상관성이 확보되면서 우리나라 겨울 기온과 물리-역학적으로 연결고리가 있는 예측인자를 선정하고자 노력하였다. 뿐만 아니라 과적합(Overfitting)의 문제를 제거하기 위해 예측인자들 사이에 상관성이 충분히 낮아야하고 이러한 조건을 만족하지 못할 경우, 통계적으로 유의한 상관성이 나타나는 두 변수 중 하나는 예측인자에서 제외하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 12월, 1월, 2월에 각각 3개씩 예측인자를 선정하였다. 이들을 이용하여 월 별로 다중회귀분석을 통해 예측 모델을 구축하였고 교차검증을 통해 그 안정성을 테스트하였다. 교차 검증은 일반적으로 많이 사용하는 특정 해(year)를 제거하고 나머지 해로 모델을 구축한 후 그 특정 해를 예측하는 leave-one-out 방법(Conv_CV)과 동아시아 몬순의 2년 주기 변동성이 있다는 선행연구(D'Arrigo et al. 2005)가 있고 이와 연관되어 우리나라 기온도 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로 홀수 해와 짝수 해를 분리하여 인접해의 효과를 제거한 후 각 그룹에 대해서 leave-one-out 방법(Odd_Even_CV)을 적용하여 안정성을 테스트하였다.

4.1 12월 기온 예측

4.1.1 12월 기온 예측인자

4.1.1.1 카라-랍테프 해(Laptev Sea) 해빙농도

북극 해빙은 일반적으로 9월에 가장 적게 덮여있고 3월에 가장 넓은 영역에서 덮이는 기후학적 계절 변동을 보인다. 9월까지 해빙이 평년보다 많이 녹으면 해빙농도(Sea ice concentration, SIC)낮아져 그 해 겨울 평년값으로 회복하는 것이 어렵고

그래서 겨울철에도 해빙이 적을 가능성이 높다. 즉 해빙은 해수면온도처럼 계절 내 시간 규모에서 어느 정도의 메모리를 가지고 있어 예측인자로 활용이 가능하다 (Francis et al. 2009; Honda et al. 2009; Petoukhov and Semenov 2010; Wu et al. 2011;2015; Wu et al. 2016.)

실시간 현업에 활용하기 위해 준실시간 자료 확보가 가능한 NCEP/NCAR R1의 해빙농도 자료를 사용하였다. 자료의 신뢰도 문제를 확인하기 위해 헤들리 센터의 해빙농도 자료와 변동성을 비교하였는데 (Fig. 4.1.1) 9월과 10월 두 자료 사이에는 영역에 따라 약간의 변동성 차이가 있지만 대체적으로 공간분포는 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 실제 예측인자로 활용가능성이 높은 유라시아 대륙 북쪽의 9월 카라-랍테프 해와 10월 랍테프 해 영역에서 평균된 두 해빙농도 자료의 시계열을 비교한 결과, 각각 0.98과 0.93으로 높은 상관성을 보여 자료 활용에 문제가 없을 것으로 판단하였다(Fig. 4.1.2).

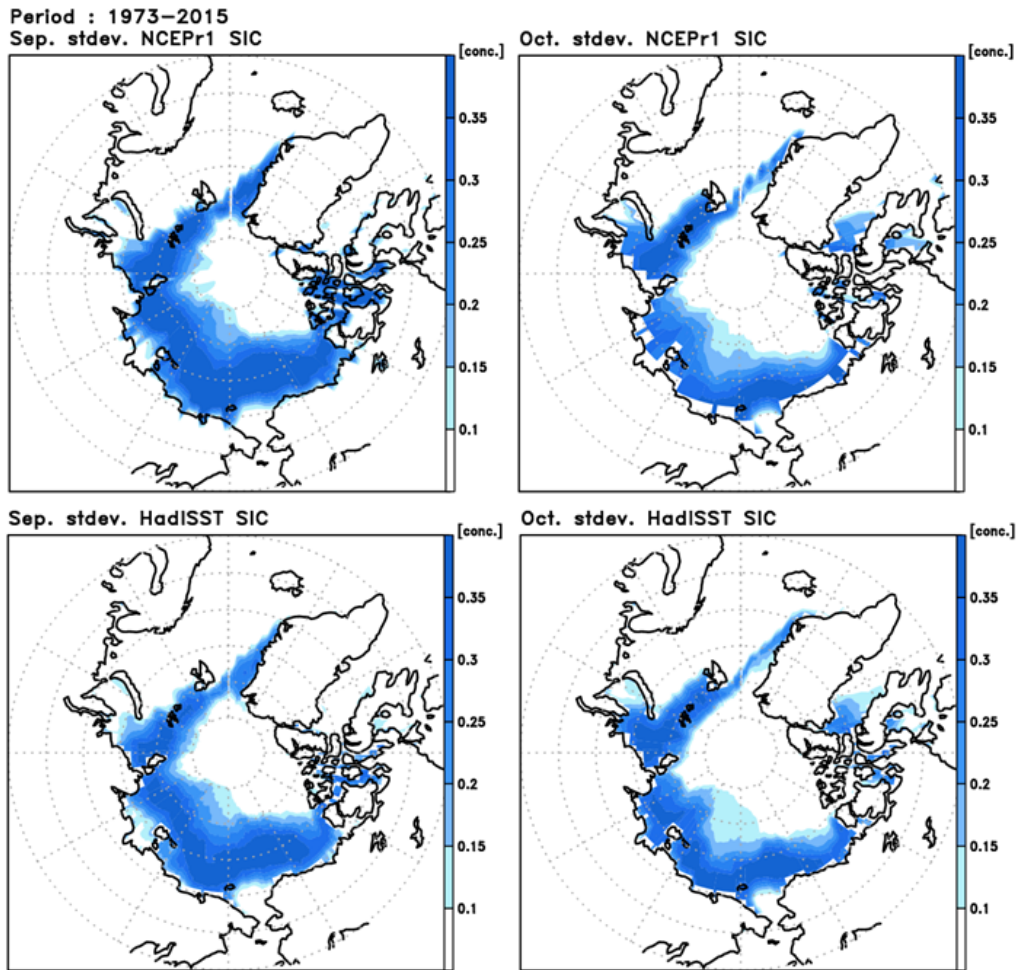


Figure 4.1.1 Variabilities(Standard deviations) of SIC over the Arctic in September and October based on NCEP r1 and Hadley SIC dataset.

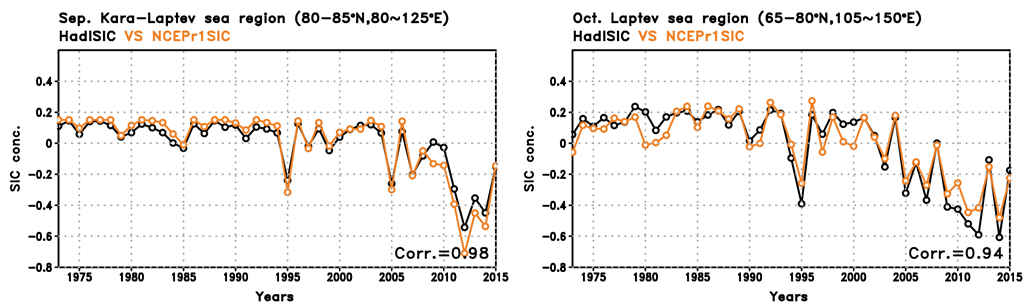


Figure 4.1.2 Timeseries comparison between NCEP r1 and Hadley SIC averaged over the Kara–Laptev Sea region in September and Laptev region in October.

북극 지역 해빙농도 중 어떤 지역이 우리나라 기온과 지연상관성이 있는지 조사하기 위해 선형추세가 제거된 우리나라 12월 기온과 8월~10월 해빙농도 편차와의 상관성을 계산하였다(Fig. 4.1.3). 타미르 반도 북쪽 랍테프 해를 중심으로 8월과 9월에 0.4 이상의 통계적으로 유의한 지연상관성이 나타난다. 10월에는 북극 해빙이 덮여가는 시기이므로 해빙의 변동이 8월과 9월보다 남쪽에서 나타나기 때문에 랍테프 해에서 상관성이 나타난다. 각 월에서 지연상관성이 나타나는 영역을 평균하여 우리나라 12월 기온과 상관성을 구해본 결과, 가장 높은 지연상관성(상관계수: +0.61)이 나타나는 9월의 타미르 반도 북쪽의 카라-랍테프 해 해빙농도 편차(80~125°E, 80~85°N)를 예측인자로 선정하였다(Fig. 4.1.3 middle).

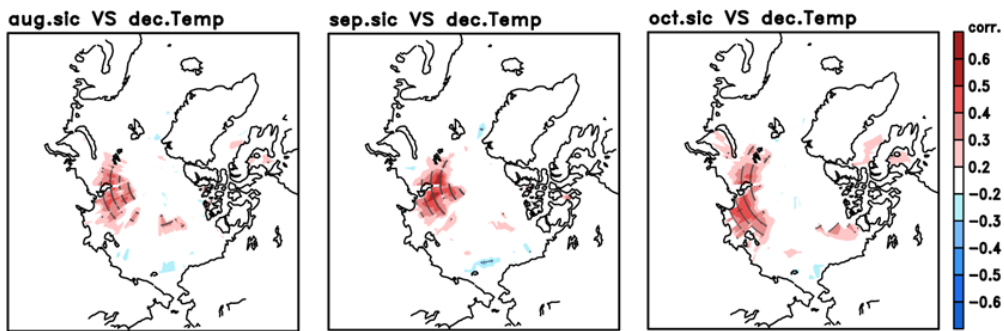


Figure 4.1.3 Lag-correlations between the autumn season(August, September and October) SIC over the Arctic and SAT in the Korean Peninsula in December

9월 카라-랍테프 해 해빙이 평년보다 많이 녹았을 때(9월 카라-랍테프 해 해빙농도 편차 < -0.75 standard dev.) 9월에서 북극 해빙농도 편차 패턴을 보면(Fig. 4.1.4), 유라시아 대륙 북쪽의 북극 해역에서 전반적으로 해빙이 적은 것을 알 수 있다. 이렇게 해빙이 평년보다 많이 녹으면 다시 얼어붙는 시기에 평년값으로 회복하기 힘들기 때문에 10월에도 많이 녹아 있는 특징이 나타난다. 해빙이 많이 녹은 지역에서는 9월과 10월 강한 기온 상승이 관측되고 11월까지 그러한 특징이 유지된다. 이 시기에 상층 지위고도 패턴을 보면 전반적으로 북유럽 지역과 극지역에 고기압성(양의 지위고도) 편차가 지배하고 11월과 12월에는 북시베리아 지역에서 블로킹 형태의 강한 고기압성 편차가 발달하고 그 남쪽에 위치한 일본을 중심으로 우리나라와 쿠로시오 해역까지 폭넓게 저기압성(음의 지위고도) 편차가 강하게 발달한다. 쿠로시오

해역의 상층 저기압성 편차는 12월 동아시아 상층 기압골의 강화를 의미하며 하층에서는 북풍 계열의 바람을 유도할 수 있는 호조건을 제공하여 우리나라를 포함한 일본은 평년보다 낮은 기온을 보인다(Fig. 4.1.4) 9월 해빙농도와 12월 순환장 사이의 지연상관성은 북극해빙의 메모리와 성층권 순환이 연관되어있을 가능성이 있다. 9월 해빙이 많이 녹으면 다시 평년만큼 얼어붙기 어려운 메모리로 10월과 11월 카라-바렌츠 해 및 척치 해까지 지속적으로 해빙이 적은 특징을 보여준다. 이는 각각 11월에 북유럽과 북시베리아 지역의 고기압성 편차의 발달과 연관되어 있는 것으로 생각되고 이 고기압성 편차가 하부 성층권까지 순압적으로 강하게 발달하는 것을 알 수 있다. 이 성층권에서의 패턴(Fig. 4.1.4)은 위도 60°N 부근에 존재하는 성층권 서풍의 극 소용돌이가 약해지는 패턴이고 이후 12월에도 성층권 극지역에서는 양과 음의 지위고도 편차가 북시베리아와 북대서양 지역에서 쌍극자 형태(Dipole shape)로 갈라지면서 성층권과 대류권 상층이 커플되어 있음을 알 수 있다. 보다 역학적이고 상세한 연구가 필요하지만 성층권까지 커플되어 발달하는 순환장의 경우 블로킹과 같이 지속성을 가질 가능성이 있다. 실제 10월 랍테프 해 해빙이 적을 경우, 11월과 12월에 북시베리아 지역에서 블로킹의 빈도가 평년에 비해 증가하는 경향을 보여 이 지역에서의 고기압성 순환이 지속적이고 강하게 발달하였음을 뒷받침한다(Fig. 4.1.5). 하지만 11월 북시베리아 지역에서의 상층 고기압성 순환의 발달이 매우 급격하고 강해서 척치 해의 적은 해빙의 역할만으로는 이를 설명하기가 어려워 보인다. 역학적 연관성에 대해서는 보다 상세한 연구가 필요하다.

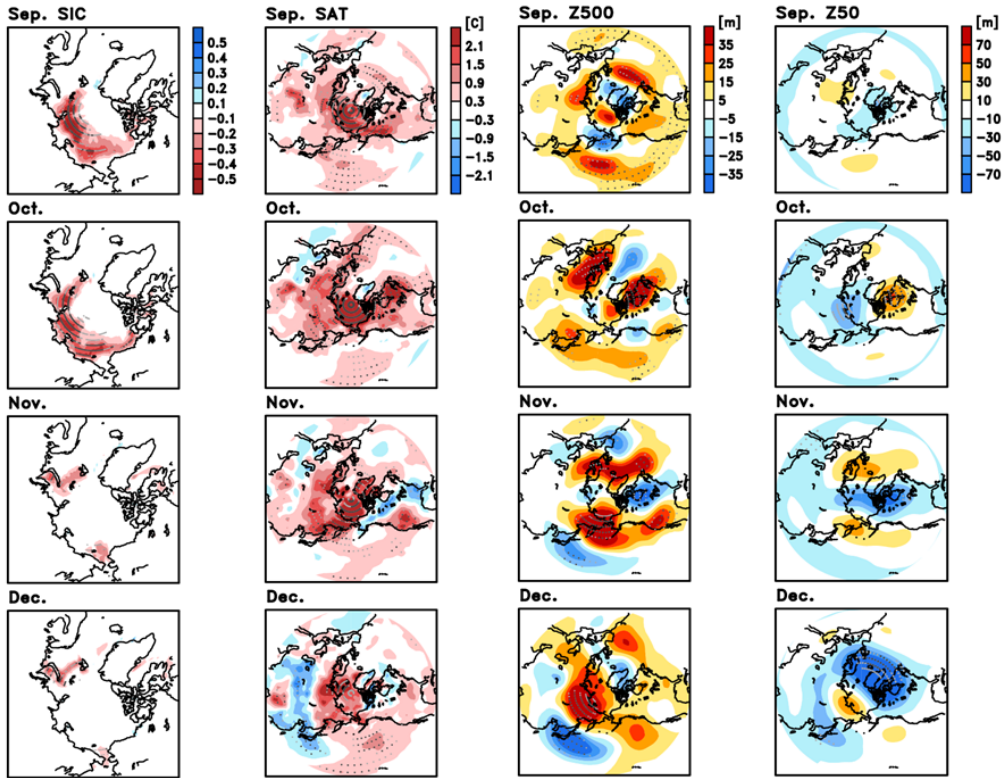


Figure 4.1.4 Composite map of the SIC(the first column), SAT (the second column) and geopotential height anomalies at 500 and 50 hPa (the third and fourth column) over the Northern Hemisphere in the years when SIC anomaly over the Kara-Laptev sea in September is smaller than its -0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

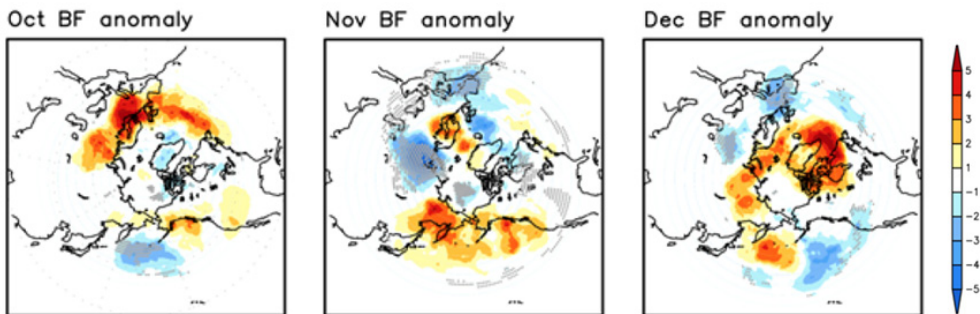


Figure 4.1.5 Composite map of blocking frequencies in cases of SIC anomaly over the Laptev sea in October > 0.75 standard dev.

4.1.1.2 가을철 동태평양 해수면온도 경향성(Tendency) : ENSO

해양은 일반적으로 대기에 비해 긴 시간규모를 가지고 변동하므로 메모리를 가진다. 따라서 이 둘 사이의 상호작용 또는 해양에 의한 대기 영향이 있다면 해양인자는 대기의 예측인자로서 활용이 가능하다. 실제 중위도 기온 및 강수 계절예측은 해빙이나 열대 해양의 변동처럼 메모리를 가진 기후인자들에 의해 그 예측성이 나오는 경우가 많다.

앞서 3.3절에서 제시한 바와 같이 열대 태평양의 대기-해양 상호작용인 ENSO는 (Nino3.4 해수면온도) 12월 우리나라 기온과 통계적으로 유의한 양의 상관성 있다. 엘니뇨와 연관된 서태평양의 대류활동 약화가 강제력으로 작용하여 우리나라 동쪽 쿠로시오 해역에 중심을 두고 고기압성 순환 편차를 발달시키고 이것이 우리나라로 따뜻하고 습한 공기를 공급함으로써 우리나라 기온이 평년보다 따뜻해지는 역학적 관계도 뚜렷하였다. 또한 ENSO에 의해 발생하는 엘니뇨와 라니냐 현상의 발달 및 쇠퇴는 뚜렷한 계절변화(Seasonal variation)를 보여준다. 엘니뇨의 경우 평균적으로 주로 여름철에 발달하기 시작하여 겨울철 최성기를 이루기 때문에 가을철 ENSO와 연관된 해양의 기후인자는 예측인자로 활용이 가능하다.

그런데 가을철 태평양 해수면온도와 12월 기온사이의 자연상관성을 조사하면 ENSO와 연관되어 보이는 유의한 상관성 패턴이 나타나지만 열대 중동태평양 영역에서 약 0.3 ~ 0.4 정도의 그리 높지 않은 상관성을 보인다(not shown). 하지만 가을철 해수면온도의 경향(10월에서 9월 해수면온도의 차이)과 우리나라 12월 기온 사이의 상관관계(Fig. 4.1.6)를 보면 적도 동태평양(250°E ~ 270°E, -5°N ~ 5°N)과 그 동북쪽의 아열대 지역(210°E ~ 230°E, 10°N ~ 20°N)에서 단순 해수면온도와의 상관성보다 높은 상관성이 나타난다. ENSO가 우리나라에 영향을 미칠 가능성이 높은 경우는 엘니뇨/라니냐와 같이 ENSO 변동이 큰 경우일 때인데, 단순 가을철 해수면온도의 스냅샷은 같은 해 겨울 엘니뇨로 발달할지 라니냐로 발달할지에 대한 정보를 정확하게 가지고 있지 못하다. 다시 말하면 가을철 해수면온도가 음의 편차면 그것이 라니냐 발달 중인지 엘니뇨 소멸 중인지 정보가 명확하지 않다. 하지만 가을철 해수면온도 경도의 경우에는 증가 경향이 있다면 그 해 엘니뇨로 발달할 가능성이 더 높고 그 정보를 지수에 담을 수 있으므로 우리나라 기온과 상관성이 높게 나타날 수 있다.

우리나라 12월 기온과 동태평양 해수면온도 사이의 동시상관성을 고려해 보면 상관성이 나오는 동태평양 가을철 해수면온도 경향은 엘니뇨/라니냐의 발달과 연관된 해수면온도의 변화를 보여주는 것이고, 그 서북쪽 아열대 지역의 해수면온도는 이 지역에서의 대기-해양 상호작용을 통해 발달한 저기압성 편차가 적도 동태평양의 서풍을 강화함으로써 엘니뇨의 발달에 영향을 미친다는 계절 발자국 역학과 연관(Seasonal footprint mechanism)되어 있는 것으로 판단된다(Vimont et al. 2001; 2003a Alexander et al. 2010). 이 두 지역의 영향을 모두 고려하기 위해 두 지역에서의 평균 해수면온도의 평균을 지수로 만들고, 실제 이 지수와 10월에서 12월까지 해수면온도와의 지연상관성을 조사하면 엘니뇨/라니냐와 매우 높은 상관성이 나오는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4.1.7).

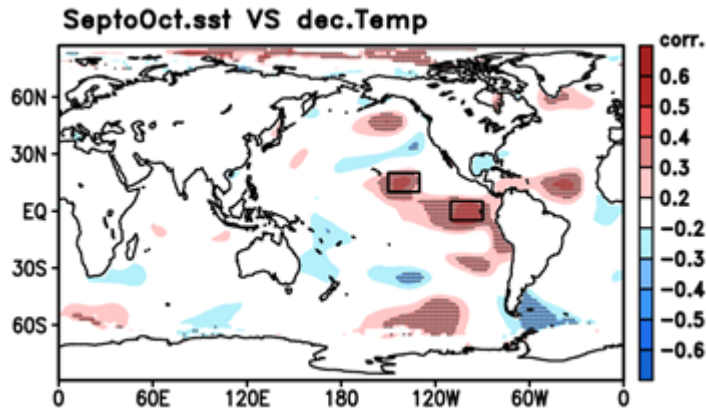


Figure 4.1.6 Lag-correlations between the SST tendency(October - September) and SAT in the Korean Peninsula in December

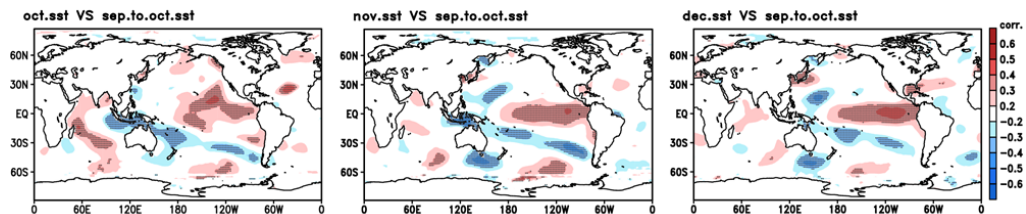


Figure 4.1.7 Lag-correlations between the SST tendency index(the predictor for Dec. SAT) and SST anomalies in Oct., Nov. and Dec.

4.1.1.3 10월 유라시아 눈덮임속도

유라시아 대륙은 기후학적으로 가을에서 겨울로 가면서 일사량이 적어지는 고위도부터 저위도로 서서히 눈으로 덮이게 되는데 이 눈덮임면적 및 그 속도는 큰 경년변동성을 가진다. 평년보다 눈이 많이 덮인 지역에서는 알베도가 증가하여 태양복사를 더 많이 반사되고 그에 따라 대기하층은 더 추워져 눈이 더 녹지 않아 쌓이기 좋은 조건을 제공하는 눈-알베도 되먹임 현상이 발생한다(Snow-Albedo feedback). 이러한 되먹임 효과는 지표 복수수지(Radiation budget)의 변화를 유발해 대기 중하층의 순환장에 영향을 미치게 된다. 특히 시베리아는 대기 대순환의 하강기류가 위치하는 지역이기 때문에 고기압 발달에 호조건을 가지고 있으며 지형적인 영향(우랄산맥 풍하층에 위치하여 하층 고기압 발달에 유리한 조건 Takaya and Nakamura 2005) 및 복사냉각(고기압 때문에 장파복사의 방출이 증가)으로 인해 기후학적으로 겨울철 시베리아 고기압이 강하게 발달한다. 이 지역에 초겨울 눈이 빨리 덮이게 될 경우 알베도가 증가하여 태양 복사를 더욱 많이 반사하게 되고 더욱 냉각되어 고기압이 더 강하게 발달할 수 있는 호조건을 제공한다. 이는 동아시아 겨울몬순을 이른 시기에 강화시키고 우리나라 겨울 기온에도 직접적으로 영향을 미칠 수 있어 초겨울 기온 변동에 중요한 기후인자로 알려져 있다.

이러한 지역적인 알베도 효과뿐만 아니라 10월 유라시아 대륙의 눈덮임이 겨울철 AO의 변동과 밀접하게 연관되어 있음이 제시되었다(Cohen et al. 2007; Flecher et al. 2007; Peings et al. 2012) 그림 4.1.8은 10월 유라시아 지역 눈덮임면적과 북반구 중위도에서 평균된 행성파(Planetary wave)의 연직 전파 강도와 상관성 및 북반구 극지역에 평균된 지위고도 편차와의 상관성을 고도와 시간에 따라 어떻게 변하는지 보여준다. 10월 유라시아에 눈덮임이 많으면 늦가을에 평년보다 많은 행성파가 성층권까지 연직 전파되고 이 행성파는 성층권에서 파괴되어 서풍의 성층권 극 소용돌이를 약화시켜 북극 지역의 양의 지위고도 편차를 유도한다(Fig. 4.1; Bladwin and Dunkerton 2001). 이러한 극소용돌이의 약화는 성층권에서 지속됨과 동시에 대류권까지 영향을 미쳐 대류권 북극 지역에도 양의 지위고도 편차, 중위도에 음의 지위고도 편차, 즉 음의 AO 형태의 대류권 순환장을 유도한다. 앞서 3.3절에서 AO와의 우리나라 기온사이의 연관성에서 제시되었듯이 음의 AO는 동아시아 겨울몬순 강화와 연관되어 있어 우리나라는 평년보다 낮은 기온을 보이는 경향이 있다.

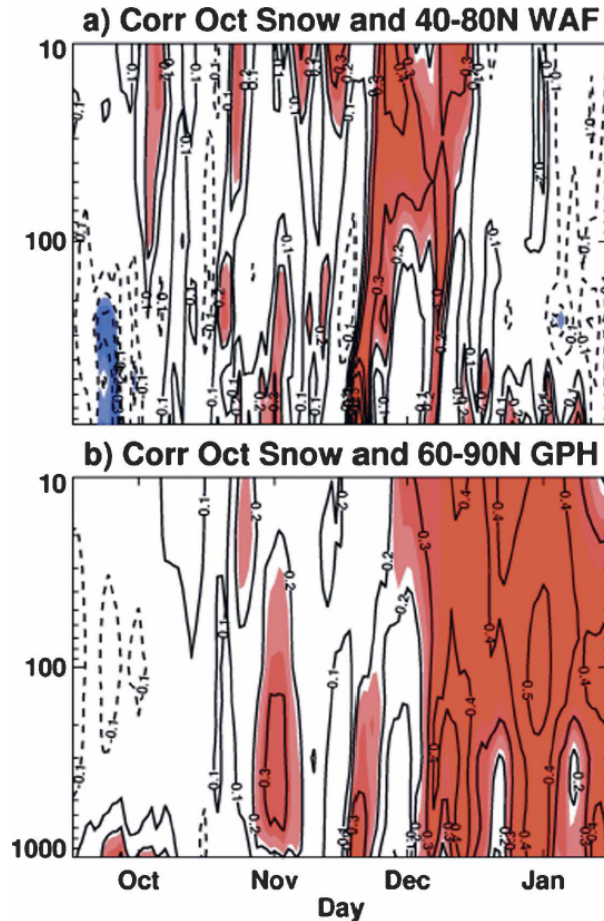


Figure 4.1.8 Correlation of the areal extent of October Eurasian snow cover with (a) daily vertical wave activity flux averaged for all grid boxes between 40° and 80°N and all vertical levels between 850 and 10 hPa, and (b) daily geopotential height averaged for all grid boxes north of 60°N and all vertical levels between 1000 and 10 hPa. Those values exceeding 90%, 95%, and 99% confidence intervals based on Student's *t* test are denoted by light, dark, and darkest shading, respectively. (Source : Cohen et al. 2007)

최근 연구에 따르면 10월 유라시아 대륙의 눈덮임면적뿐만 아니라 눈덮임의 속도가 겨울철 AO와 높은 상관성이 있음이 제시되었으며(Cohen et al. 2011) 본 연구에서도 예측인자로 활용하였다. Cohen 등(2011)에서는 유라시아 대륙(0 ~ 180E°, 25 ~ 60°N)의 10월 눈덮임면적 일(daily) 자료의 선형추세를 지수(Snow Advanced Index, SAI)로 활용하지만, 눈덮임면적의 일 자료는 누적 기간이 짧아 본 연구에서의 통계모델 구축에 활용하기 어렵다. 본 연구에서는 주 별(weekly) 자료를 활용하여

10월 마지막 주에서 첫째주의 유라시아 대륙의($0 \sim 180^{\circ}\text{E}$, $25 \sim 65^{\circ}\text{N}$) 눈덮임면적을 빼는 것으로 SAI를 정의하였다. 이렇게 생산된 지수와 겨울철 평균 AO 지수와의 상관계수는 1973-2014년 기간에는 -0.53, Cohen 등(2011)의 연구와 같은 기간(1997-2010년)동안에는 -0.70으로(Fig. 4.1.9) 일 자료를 사용한 선행연구의 결과와 비교할 만 하다고 판단하였다. 실제 SAI와 우리나라 12월 기온과의 상관계수는 -0.31로 크게 높지는 않지만 통계적으로 유의하여 예측인자로 활용 가능할 것으로 판단하였다.

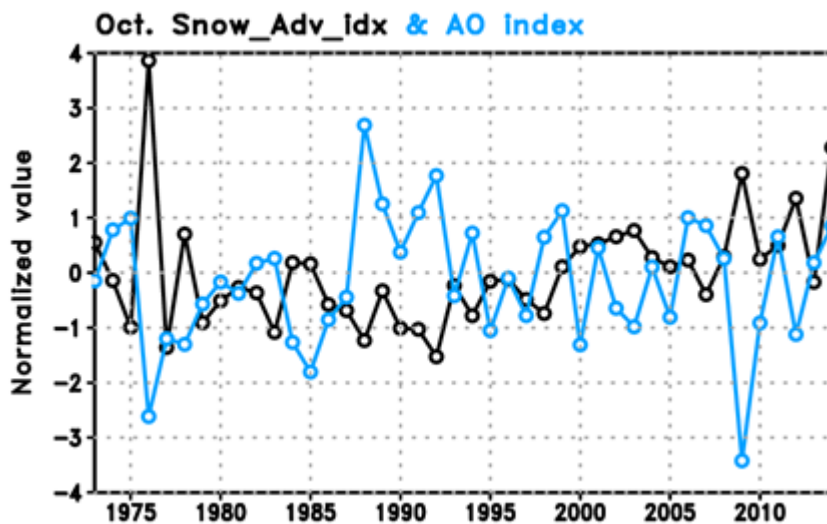


Figure 4.1.9 Timeseries of snow advanced index in October(Black circle line) and winter seasonal mean AO index(Blue circle line) during 1973~2014

실제 본 연구에서 제시한 10월 유라시아 눈덮임속도 지수가 클 때(눈덮임이 평년보다 빠를 때, $\text{SAI} > +0.75$ standard dev.)의 10월~1월 사이의 눈덮임면적의 합성장을 보면 눈덮임이 빠를 때 유라시아 대륙에 11월과 12월 평년보다 많은 눈이 덮였음을 알 수 있다(Fig. 4.1.10). 이 때의 성층권 50 hPa 순환장을 보면 11월부터 극지역에서 양의 지위고도 편차가 나타나고 12월과 1월에 매우 강하게 발달하는 특징을 보인다(Fig. 4.1.11). 이러한 성층권의 패턴은 대류권 상층과 해면기압 패턴까지 순압적으로 나타나는데 음의 AO 유사한 매우 유사한 패턴을 보여 우리나라는 기온은 음의 값을 뚜렷하게 보여준다. 반대로 눈덮임속도 지수가 작을 때 ($\text{SAI} < -0.75$

standard dev.)는 11월과 12월에 유라시아 대륙에서 평년보다 눈이 적게 덮이는 특징이 잘 나타나고(Fig.4.1.10) 이와 연관되어서 성층권 및 대류권에 양의 AO 패턴이 뚜렷해 우리나라와 동아시아는 따뜻한 경향이 나타난다(Fig. 4.1.12).

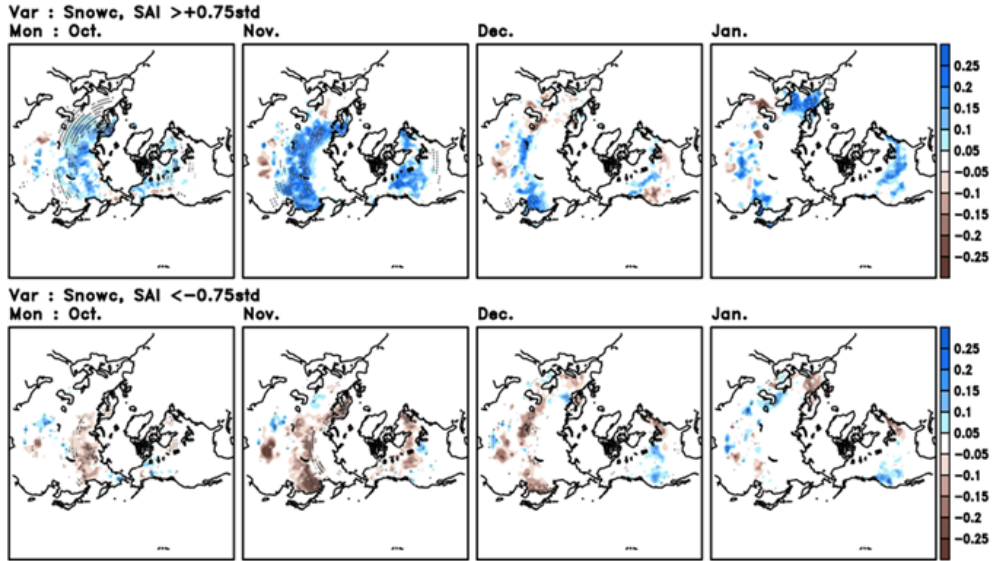


Figure 4.1.10 Composite map of the snowcover extent anomalies over the northern hemisphere in the years when the SAI in October is larger(smaller) than its $+0.75(-0.75)$ standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

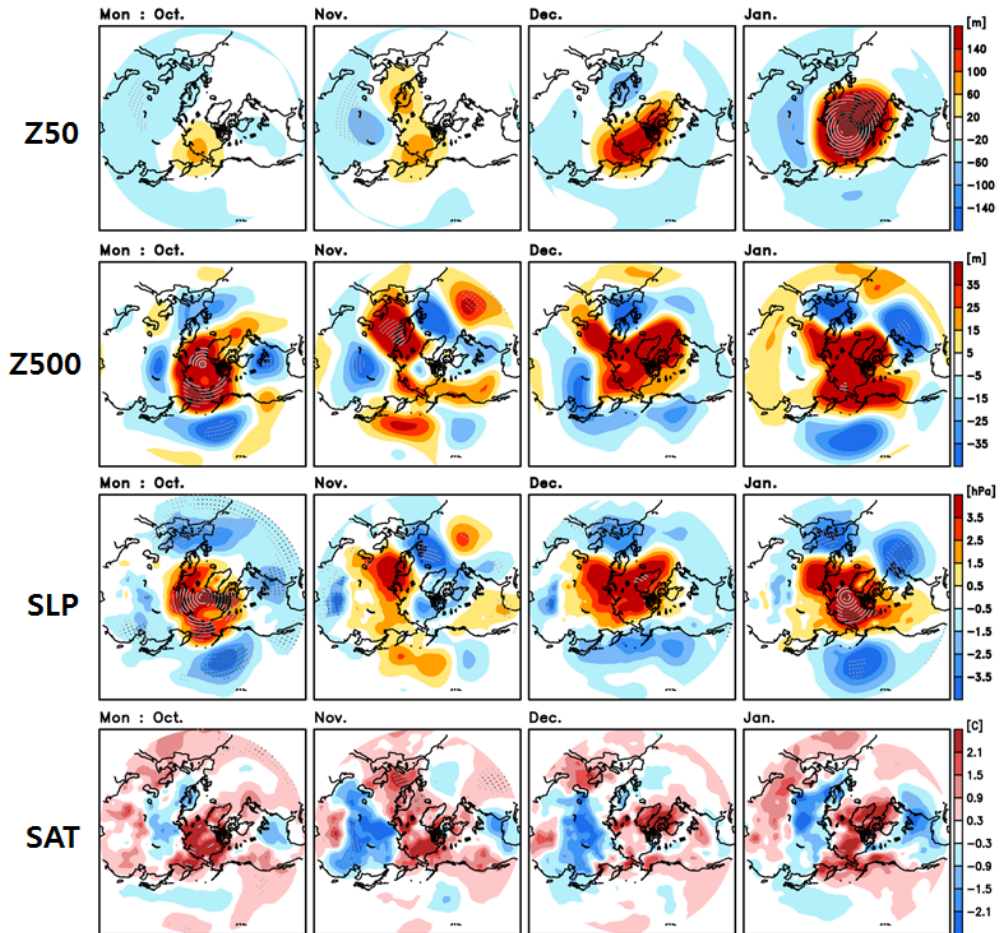


Figure 4.1.11 Composite map of the geopotential height anomalies at 50 hPa and 500 hPa, sea-level pressure and SAT over the northern hemisphere during October to January in the years when the SAI in October is larger than its +0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

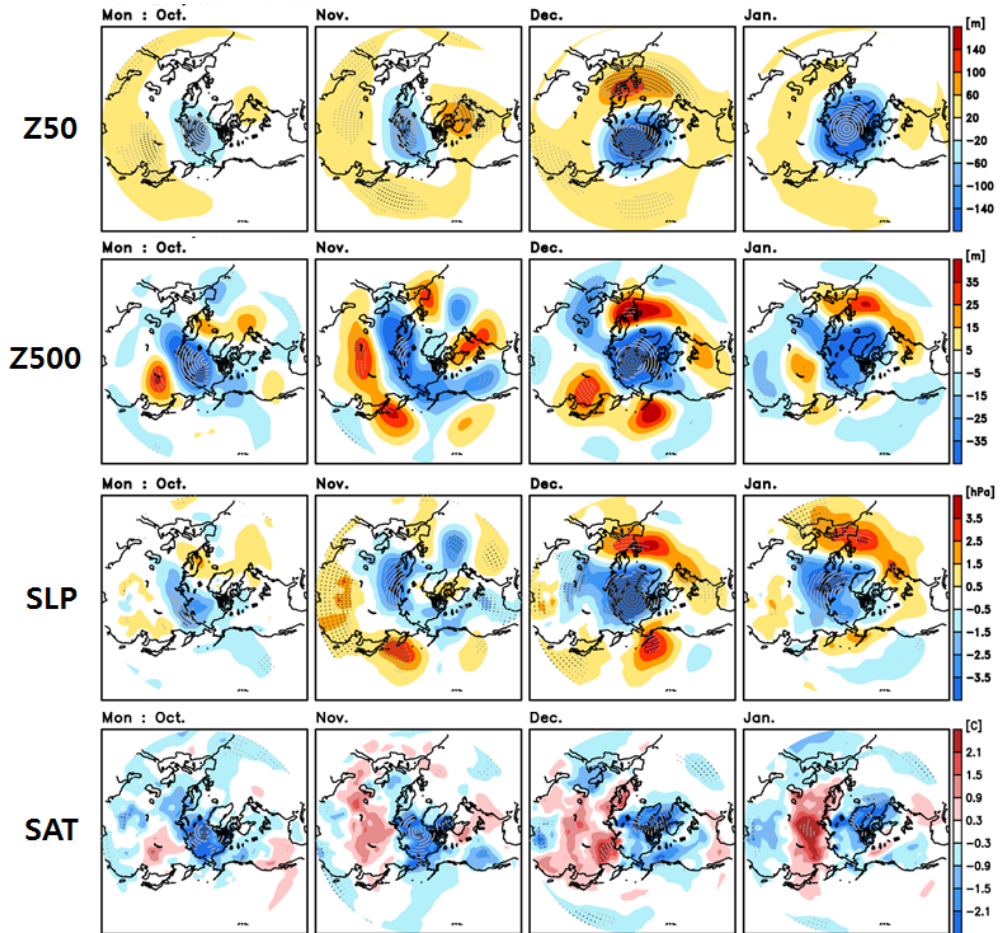


Figure 4.1.12 Same as Figure. 4.1.10 but for the years when the SAI in October is smaller than its -0.75 standard deviation.

4.1.2 12월 기온 통계예측 모델 및 검증

4.1.1절에서 제시한 12월 기온 예측인자들 간 상관성을 조사한 결과, 통계적으로 유의한 상관성은 나타나지 않아(Table 4.1.1) 예측인자 간 독립성을 가정하기에 무리가 없다고 판단하였고 다중선형 회귀 분석을 통해 통계예측 모델을 구축하였다(식 4.1).

$$SAT_{pred} = 0.62 * SIC_{kalapt} + 0.62 * ENSO - 0.27 * SAI \quad (4.1)$$

* 우리나라 기온과 예측인자들의 선형추세는 제거되었음

12월 통계 모델이 예측한 우리나라 12월 기온과 관측 기온 사이의 상관계수는 0.75로 매우 높은 상관성을 보여주었다(Fig. 4.1.12). 예측인자들이 얼마나 안정적인지 예측을 수행하는지 조사하기 위해 두 가지 교차검증 방법(Conv_CV와 Odd_Even_CV)을 사용하여 테스트하였다(Fig. 4.1.14). Conv_CV의 경우, 관측과의 상관계수는 0.71이었고 교차검증 중 다중회귀 계수의 변화도 거의 없어(Fig. 4.1.14) 특정 해의 영향이 크게 반영되지 않고 안정적인 예측 수행이 가능한 것으로 판단되었다. 또한 동아사아 몬순의 2년 주기를 고려한 Odd_Even_CV를 시행하였을 경우에도 0.74의 상관계를 보여 두 가지 방법에서 모두 안정적인 예측성능을 보여주었다.

Table 4.1.1 Correlations coefficients between the SAT over the Korean Peninsula in December and the predictors. And correlation coefficient among the predictors for the SAT. Symbol '**(*)' indicates the value which is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

변수	9월 카라-쿠파프 해 해빙농도	동태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)	10월 유라시아 눈덮임속도
12월 우리나라 기온	0.61**	0.58**	-0.31*
9월 카라-쿠파프 해 해빙농도		0.22	-0.22
동태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)	×		-0.08
10월 유라시아 눈덮임속도	×	×	

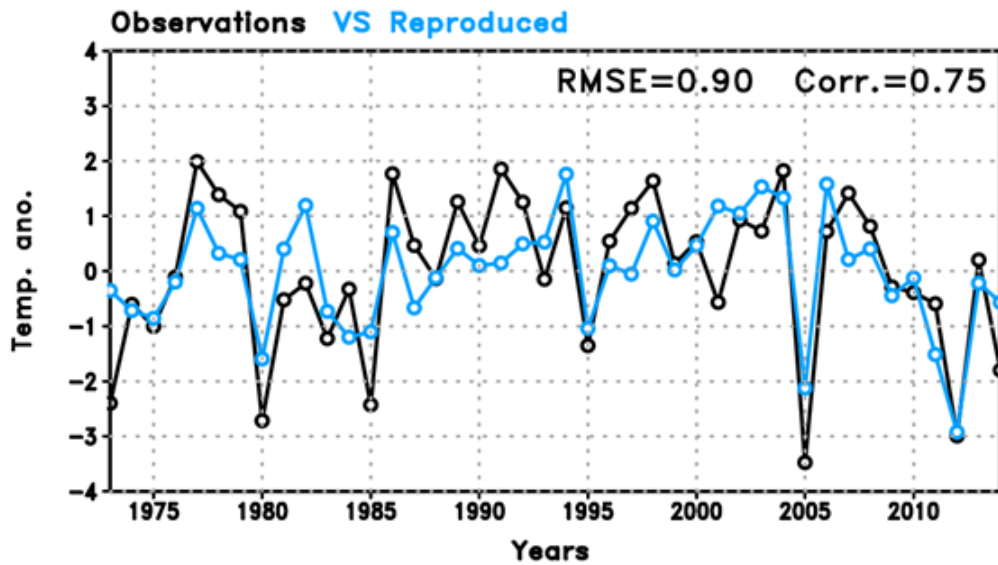


Figure 4.1.13 Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in December(Black circle line) and the reproduced SAT by the statistical model based on the predictors(Blue circle line). RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

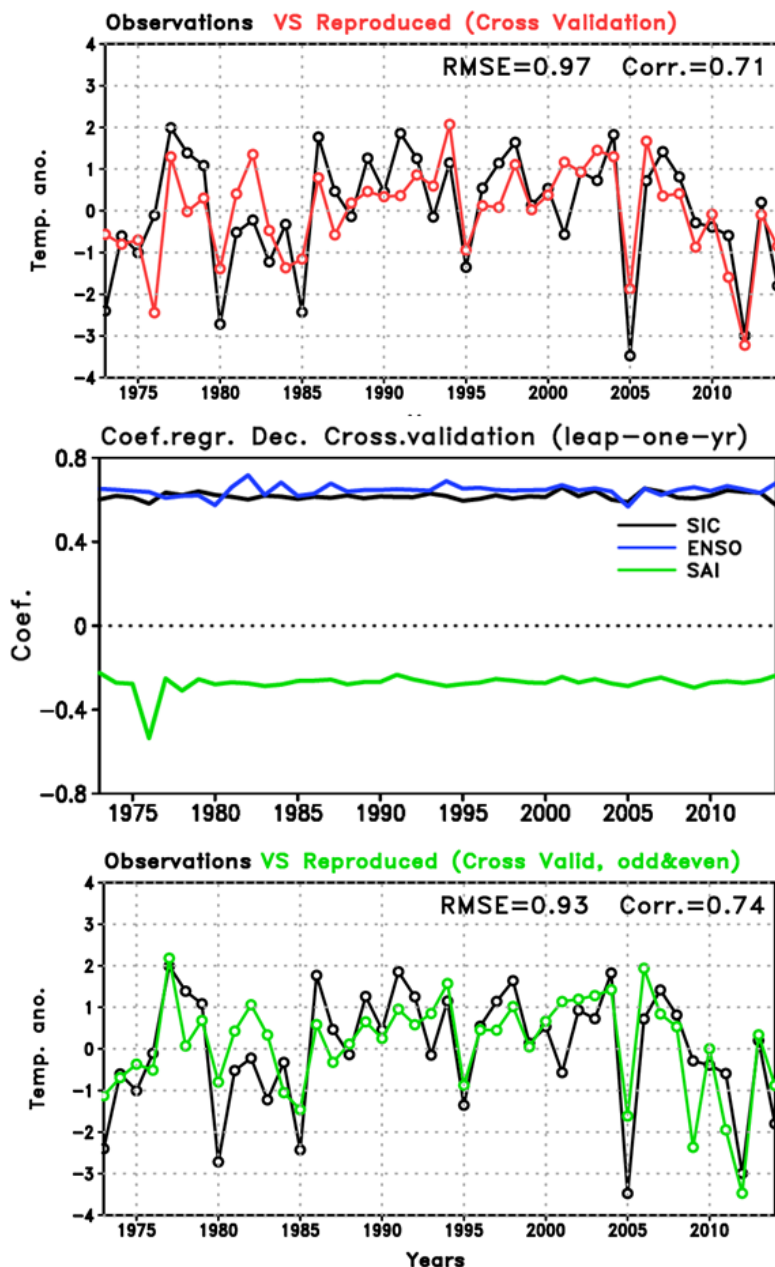


Figure 4.1.14 (Upper row) Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in December and the SAT(Black circle line) in the cross validated hindcast prediction by the conventional leave-one-out cross validation(Conv. CV). (Middle row) Variation of multiple regression coefficients of the predictors in leave-one-out cross validation. (Lower row) same as the upper row but for Odd&Even CV. RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

12월 예측 모형의 오차의 크기를 보기위해 예측 기온과 관측 기온의 차이를 조사하였는데(Fig. 4.1.15), ± 1.5 를 넘는 경우는 거의 없이 전반적으로 안정된 예측을 하는 것으로 판단되었다. 그럼에도 불구하고 오차는 존재하는데, 다중선형 통계 모형에서의 오차를 유발하는 원인에는 여러 가지가 있다. 그 대표적인 것이 훈련기간 내에서의 예측인자와 예측타겟변수 사이의 상관성의 변화이다. 예측인자들과 예측타겟변수 사이의 상관성의 상대적인 크기와 실제 구축된 모형의 기여도 사이에 차이가 발생하는 기간에 예측성의 오차가 발생할 가능성이 크다. 실제 12월 기온예측 모형에서도 훈련기간에 대해 21년 윈도우로 예측인자와 예측타겟변수의 상관성을 보면(Fig. 4.1.15) 우리나라 기온과 눈덮임 및 ENSO 사이의 상관성에서 다소 약한 장기 변동이 나타나 오차를 유발한 원인으로 작용하였을 가능성이 있다. 하지만 상관성의 부호가 바뀌는 등의 큰 변화는 없어 안정적인 예측성이 나오는 것으로 판단된다.

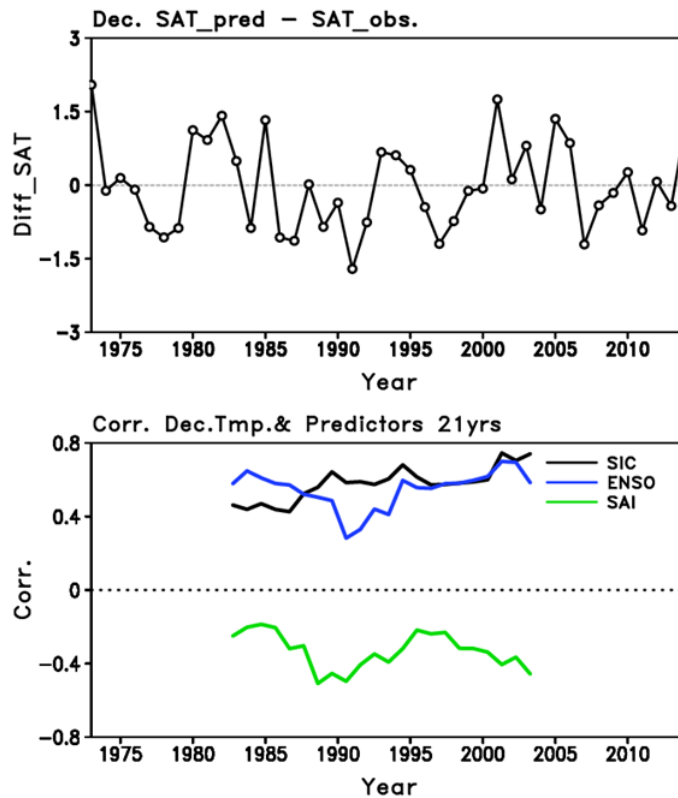


Figure 4.1.15 (Upper row) Deviation of the predicted SAT from the observation SAT. (Lower row) Running correlation with 21-year window between the SAT in December and its predictors during 1973~2015.

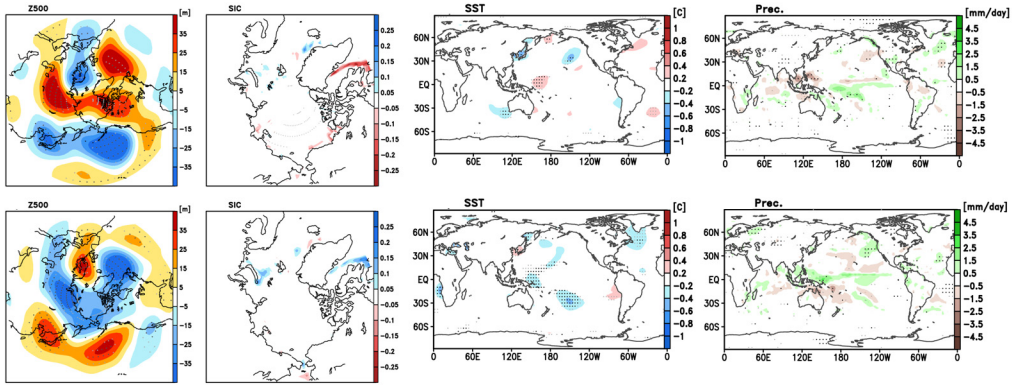


Figure 4.1.16 Composite map of the geopotential height, SIC, SST and precipitation anomalies over the northern hemisphere in the years when the difference between observational SAT and predicted SAT in December is larger(smaller) than its $+0.75(-0.75)$ standard deviation in upper(lower)-row. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

또한 이 모델에서의 오차와 연관된 특정 패턴이 있는지 조사하기 위해, 다시 말하면 이 모델이 특정 변동이나 특정 예측인자와 연관되어 설명하지 못하는 우리나라 12월 기온변동성이 있는지 조사하기 위해 예측 오차가 양으로 큰 경우와 음으로 큰 경우에 대해 순환장, 해빙, 해수면온도 그리고 강수에 대해 합성분석을 수행하였다(Fig. 4.1.16). 모형이 양의 값을 예측하였는데 실황은 음의 기온일 경우 그 차이는 양으로 크게 되고 그 때의 상층 순환장 패턴을 보면, 우리나라에는 음의 지위고도 편차가 매우 강하고 그 풍상측으로 북대서양까지 뚜렷한 파동형태의 패턴을 보인다. 사실 이 파동패턴은 우리나라 12월 기온과 500 hPa 지위고도 사이의 상관성 패턴(Fig. 3.1.1)과 매우 유사하다. 이는 오차의 시계열이 동아시아 겨울몬순과 연관된 상층 패턴과 연관되어 있다고 볼 수 있고 따라서 12월 예측 모델에 사용된 예측인자들이 동아시아 겨울몬순 변동성을 완전히 설명할 수는 없기 때문에 오차 패턴에서 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 북대서양으로부터 뚜렷하게 파동 패턴이 나타나는 것은 구축된 통계 모형이 북대서양으로부터의 파동전파에 따른 우리나라 12월 기온의 변동을 설명하지 못하는 것으로 해석이 가능할 것 같다. 실제 북대서양 지역의 중요한 변동성 중 하나인 NAO(North Atlantic Oscillation)는 계절 내 시간규모에서 대류권의 로스비 파동전파와 연관되어 우리나라의 기온과 상관성이 나타난다(Sung et al. 2010; Takaya and Nakamura 2005) 하지만 북대서양 지역에서의 변동성은 계절 내 시간규모에서 크기 때문에 예측인자로 활용하기 힘든 측면이 있으며 이러한 변동성

을 고려하지 못한 통계 모형의 특성이 오차 패턴으로 나타나는 것으로 판단된다.

이러한 유라시아 대륙으로 부터의 패턴 외에도 상층 순환장 패턴에서 뚜렷한 것은 적도로부터의 원격상관 패턴이다. 모형이 실제 관측 보다 따뜻하게 모의한 경우 오차 패턴은 엘니뇨와 연관된 PNA-like 형태를 보여주고 반대의 경우는 대칭적으로 라니냐와 연관된 것 같은 형태의 원격상관 패턴이 나타나지만, 해수면온도 합성장에서는 뚜렷한 엘니뇨나 라니냐의 형태는 보이지 않아 12월 예측 모델의 오차를 엘니뇨/라니냐와 직접 연결시키는 것은 어려워 보인다. 그럼에도 불구하고 강수 패턴을 보면 서태평양 지역에서 오차가 양으로 클 때와 음으로 클 때가 반대되는 패턴이 뚜렷하게 나타난다. 관측보다 따뜻하다고 예측한 해에는 서태평양의 강수가 적어 대류활동이 약했고 반대의 해에는 서태평양 강수가 많아 대류활동이 강했다. 일반적으로 서태평양에 대류활동이 약할 경우 우리나라는 따뜻한 경향을 보이는데(Son et al. 2014), 오차와 연관된 강수 패턴을 보면 서태평양 대류활동 약함(강함)에도 불구하고 추웠을 때(따뜻했을 때)를 통계 모델이 잘 예측하지 못하였던 것으로 생각된다.

4.2 1월 기온 예측

4.2.1 1월 기온 예측인자

4.2.1.1 카라 해(Kara Sea) 해빙농도

앞서 12월 예측인자에서 설명한 바와 같이 북극 해빙이 여름과 초가을에 많이 녹으면 기후학적으로 얼어붙는 기간(늦가을 ~ 초봄)동안 평년만큼 얼어붙기가 힘들어 겨울철 대기순환에 영향을 주기 때문에 예측인자로 활용이 가능하다. 뿐만 아니라 최근 연구에 따르면 초겨울(11월과 12월) 카라-바렌츠 해 해빙이 많이 녹는 것과 연관된 순환장 패턴은 평년보다 많은 행성파의 연직전파를 만들어 내고 이는 성층권까지 전파되어 성층권의 극소용돌이를 약화시켜 성층권 극지역에 강한 양의 지위고도 편차를 유발할 수 있음을 제시하였다(Jaiser et al. 2012; Kim et al. 2014; King et al. 2015; Nakamura et al. 2016). 이런 성층권 극소용돌이의 약화가 매우 강하면 대류권까지 영향을 주어 음의 AO 형태의 순환장을 유발할 수 있는데(Baldwin and Dunkerton 1998; 2001; Limpasuvan et al. 2004; Woo et al. 2015b) 이러한 특징

은 해빙 변동의 직접적인 메모리와 함께 예측인자로 활용할 수 있는 역학적 근거를 될 수 있다.

그림 4.2.1은 1월 기온과 가을철 북극 해빙농도 사이의 지연상관성을 보여준다. 우리나라 1월 지상기온은 카라 해 해빙과 지속적으로 강한 양의 상관성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 10월 카라 해 북쪽 지역에서 가장 높은 상관성(상관계수 : +0.46)이 나타나 예측인자로 활용하였다.

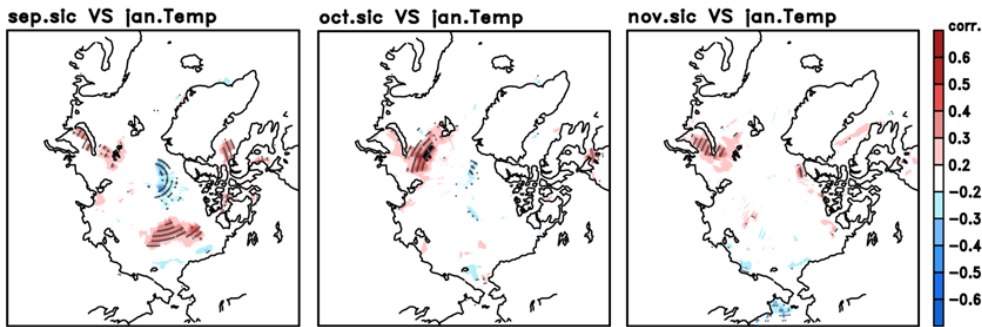


Figure 4.2.1 Lag-correlations between the autumn season(August, September and October) SIC over the Arctic and SAT in the Korean Peninsula in January.

기존연구에서 제시된 성층권-대류권 커플링의 역학이 이 예측인자와 연관되어 나타나는지 조사하기 위해 10월 카라 해에 해빙의 변동에 따라 성층권 및 대류권 순환장과 지상기온의 합성분석을 수행하였다(Fig. 4.2.2). 합성사례의 추출을 위해 카라 해 북부지역($40 \sim 80^{\circ}\text{E}$, $78 \sim 82^{\circ}\text{N}$) 지역에서 평균된 해빙농도 편차를 지수로 사용하였다. 10월 카라 해에 해빙이 적은 경우(10월 카라 해 해빙농도 지수 < -0.75 standard dev.)에 북극 해빙농도 패턴을 보면 10월에 매우 적은 해빙농도를 보이는 것은 당연하지만 11월과 12월, 심지어 1월까지도 해빙이 적은 경향이 통계적으로 유의하게 나타난다. 이는 가을철 많이 녹은 해빙이 평년까지 얼어붙기 힘든 메모리를 보여주는 것으로 판단되며 특히 11월과 12월까지는 적은 경향이 매우 뚜렷한데 이때의 대류권 순환장 패턴을 보면 북유럽과 우랄 산맥 부근의 양의 지위고도 편차가 뚜렷하고 우리나라 상층에 음의 지위고도 편차가 나타난다. 이 패턴은 행성파의 연직전파 및 성층권 극소용돌이와 높은 상관성이 나타나는 지역이고(Garfinkel et al.

2010; Kolstad and Chalton-Perez) 선형간섭(Linear interference) 관점에서 보면 평년보다 연직 전파가 많이 일어나는 경향을 보이는 패턴이다(Kim et al. 2014; Polvani and Waugh 2004; Woo et al. 2015b). 실제로 12월 성층권 순환장 패턴을 보면 북극을 중심으로 양의 지위고도와 음의 지위고도가 북시베리아와 북미 지역에 갈라져 있으며 이는 북극을 중심으로 서풍으로 회전하는 고리형태의 극소용돌이가 약화될 수 있는 패턴이다. 1월이 되면 양의 지위고도 편차가 60도 이상 북극권에 지배적으로 나타나서 극소용돌이가 크게 약화된 것을 확인할 수 있다. 이 때의 대류권 극 지역에서도 양의 지위고도 편차가 두드러지고 음의 AO와 유사한 패턴이 뚜렷하다. 특히 우리나라와 동아시아 지역에는 음의 지위고도 편차가 발달하여 동아시아 기압골이 강화되고 실제 우리나라를 포함한 동아시아는 평년보다 낮은 기온을 보임을 확인할 수 있다. 반대로 10월 카라 해 해빙이 많을 경우(Fig.4.2.3) 대칭적으로 성층권 극소용돌이는 평년보다 강해지고 1월 대류권에서는 양의 AO와 유사한 형태의 대류권 순환장 패턴을 보여 우리나라를 포함한 동아시아는 평년보다 높은 기온을 보인다. 이러한 특징들은 선행연구와도 매우 잘 일치하는 결과로 선정된 10월 카라 해 해빙농도를 예측인자로 활용할 수 있음을 보여준다.

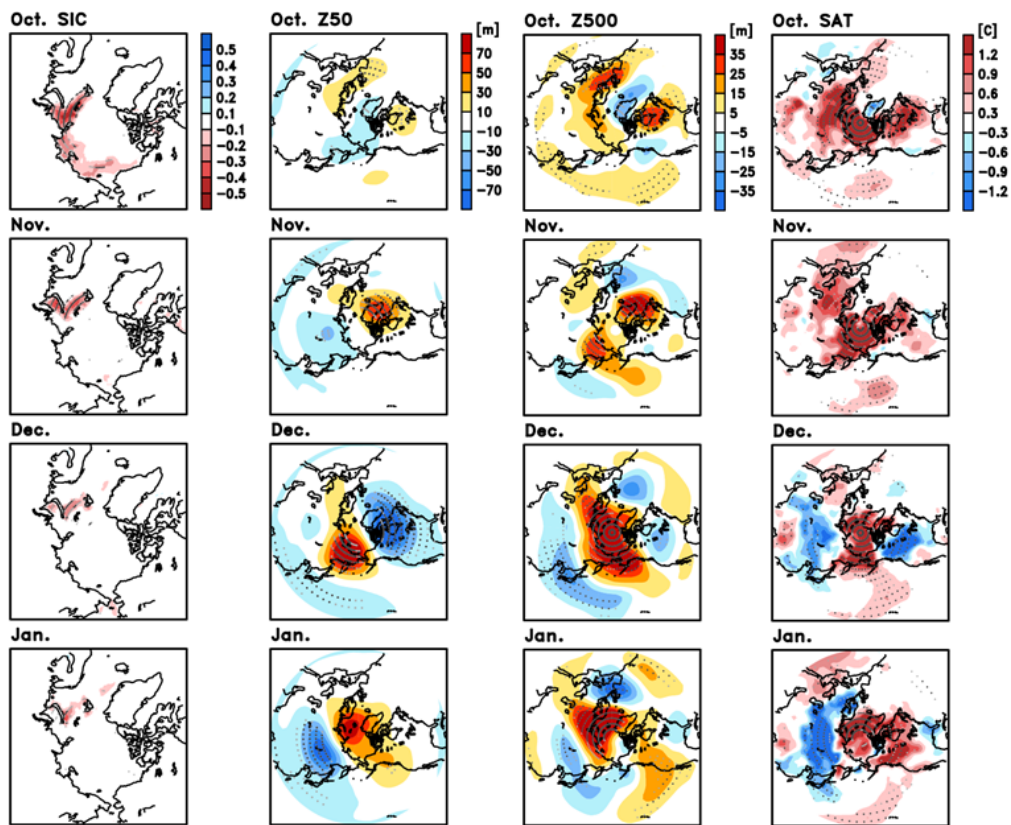


Figure 4.2.2 Composite map of the SIC(the first column), SAT (the second column) and geopotential height anomalies at 500 and 50 hPa (the third and fourth column) over the Northern Hemisphere in the years when SIC anomaly over the Kara sea in October is smaller than its -0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

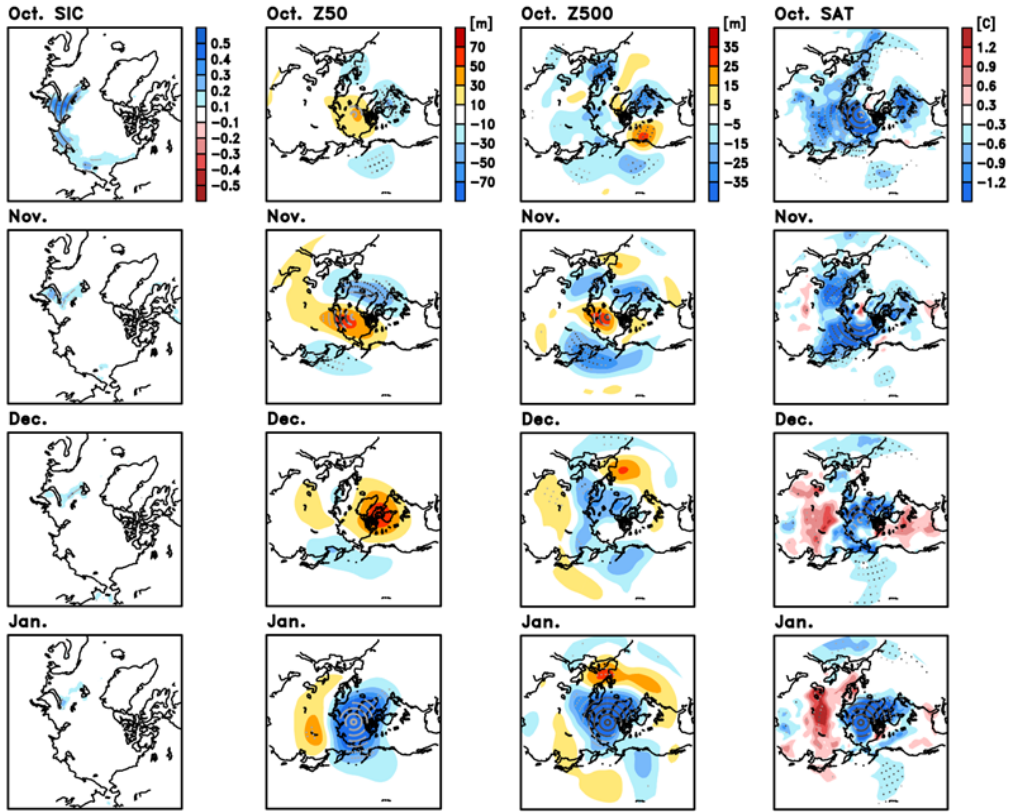


Figure 4.2.3 Same as Figure. 4.2.2 but for in the years when SIC anomaly over the Kara sea in October is larger than its +0.75 standard deviation.

4.2.1.2 가을철 태평양 해수면온도 경향(Tendency)의 동서경도(Gradient)

우리나라 1월 기온과 가을철 해수면온도 편차와 직접적인 상관성을 조사하면 상관성이 높은 지역이 거의 나타나지 않는다(not shown). 하지만 12월 기온 예측인자 선정에서처럼 9월과 10월 사이의 기온 경향과 상관성을 보면 열대 동태평양 지역과 양의 상관성이, 서태평양 지역에서는 음의 상관성에 매우 뚜렷하게 나타난다(Fig. 4.2.4). 이는 동태평양에서 가을철 해수면온도가 높아지고 서태평양에서는 해수면온도가 낮아지면 우리나라 기온이 평년보다 높아짐을 의미한다. 이러한 해수면온도 경향의 패턴은 ENSO와 연관되어 있을 가능성이 높아 두 지역의 온도 경도가 엘니뇨/라니냐 발달에 중요할 것으로 판단하였다. 뿐만 아니라 최근 연구결과를 보면 ENSO

를 표현하는 대표적인 Nino3.4 지수보다 그와 연관된 동태평양과 서태평양의 대류활동의 변화를 모두 고려할 때 우리나라와 기온 및 강수의 변동을 많이 설명할 수 있음이 제시되었다 (Kim et al. 2016). 따라서 본 연구에서는 동태평양($247^{\circ} \sim 263^{\circ}E$, $8^{\circ}S \sim 2^{\circ}N$)과 서태평양($145^{\circ} \sim 175^{\circ}E$, $13^{\circ}S \sim 3^{\circ}N$)의 영향을 모두 고려하기 위해 두 지역에서의 해수면온도의 경도를 지수로 정의하여 예측인자로 활용하였다.

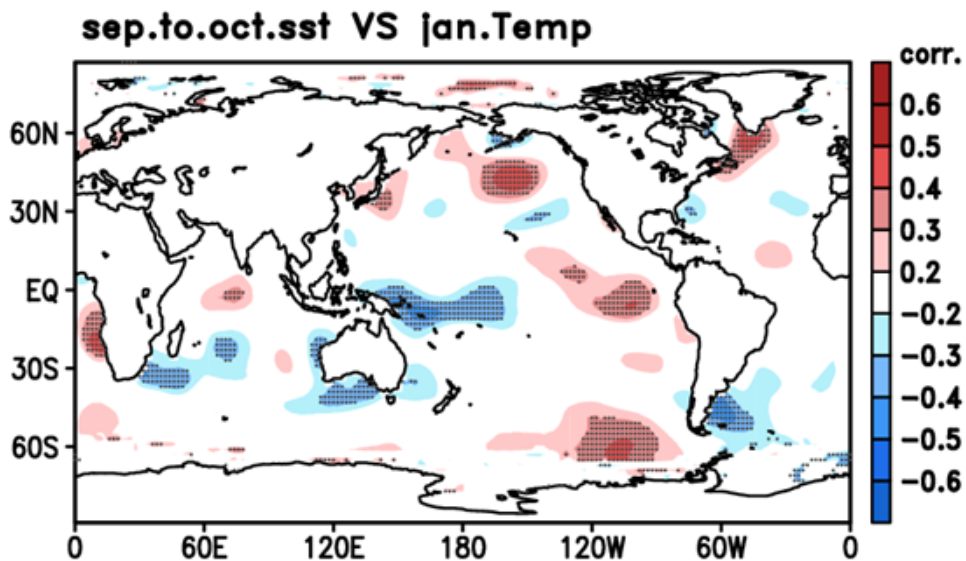


Figure 4.2.4 Lag-correlations between the SST tendency(October - September) and SAT in the Korean Peninsula in January.

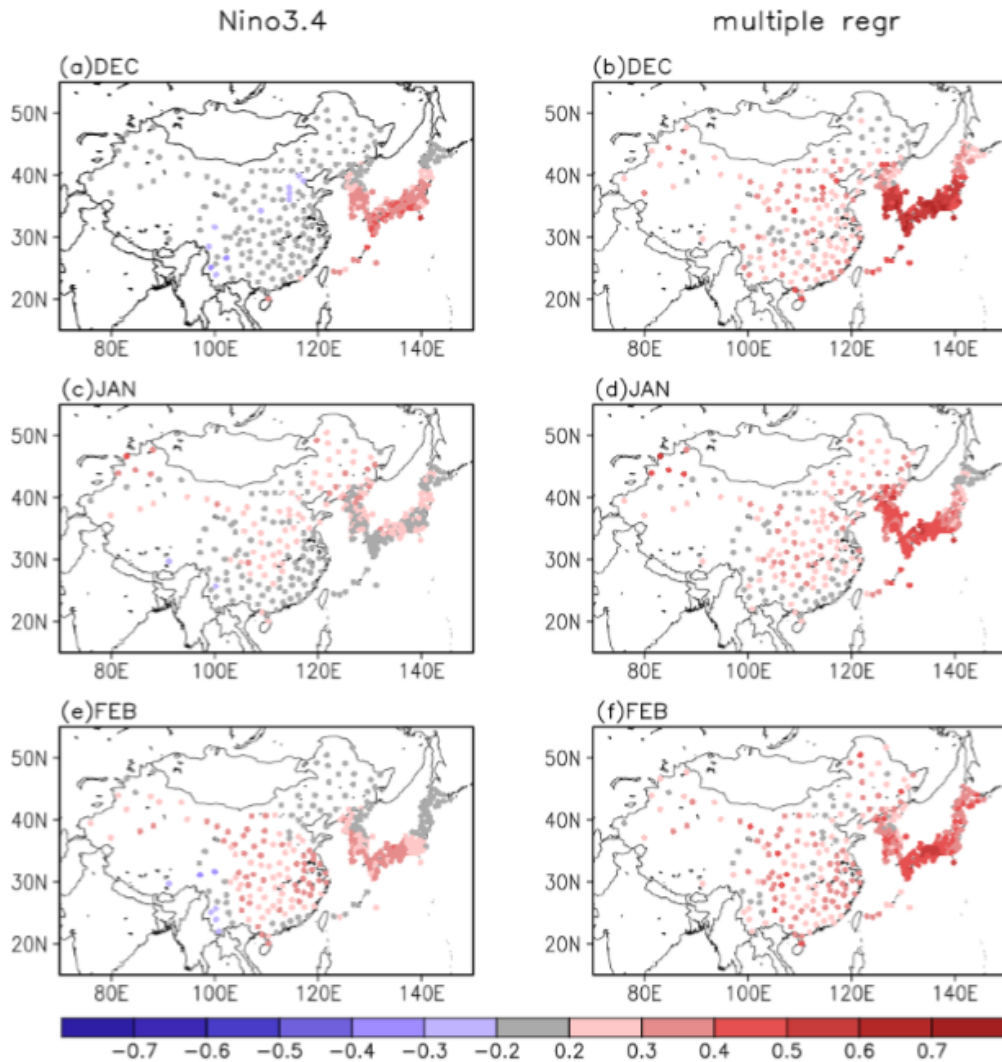


Figure 4.2.5 (Left column) Correlation between Nino3.4 index and the observational SAT over East Asia in the winter season. (Right column) Correlation between SAT regressed multiply on the precipitation over the western Pacific and central Pacific and the observational SAT (Source : Kim et al. 2016)

사실 Nino3.4 지역 해수면온도 편차 지수와 우리나라 1월 기온사이에는 통계적으로 유의한 상관성이 나타나지 않기 때문에 열대 태평양 해수면온도 변동과 연관된 이 예측인자가 ENSO와 연관되어 우리나라 기온과 역학적인 관계가 있음을 보여주는 것은 매우 중요하다고 판단된다. 그림 4.2.6은 지수가 양으로 클 때 해수면온도, 강수, 500hPa 지위고도 및 지상기온 편차의 합성장을 보여준다. 보시는 바와 같이 동태평

양에서 중태평양까지 양의 해수면온도 편차가 뚜렷하여 엘니뇨와 연관성이 있음을 알려준다. 사실 지수에 활용한 해수면온도 경향의 동서경도를 물리적으로 명확하게 해석하기는 애매한 측면이 있지만, 해수면온도 합성장의 결과는 이 예측인자가 ENSO와 연관되어 있음은 보여준다. 특히 대류활동과 상관성이 높은 강수패턴을 보면 11월에서 1월까지 엘니뇨와 연관된 서태평양 강수 억제 및 중동태평양 강수 강화가 뚜렷하게 나타난다. 여기서 좀 더 명확하게 잡고 넘어갈 것은 중동태평양 강수 패턴만큼 서태평양에서의 강수 패턴도 이 지수와 상관성이 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 예측인자가 ENSO와 연관되어 있지만 서태평양의 변동 또한 많이 설명하고 있음을 의미한다. 실제 우리나라 겨울 기온은 중동태평양뿐만 아니라 서태평양의 대류활동이 매우 중요하다(Kim et al. 2016). 그림 4.2.5는 Nino3.4 지수와 연관된 우리나라 기온과 서태평양 강수 및 중태평양 강수에 다중 선형 회귀된 우리나라 기온 비교를 보여준다. 이 결과는 단순한 ENSO 감시구역의 SST 변동보다는 서태평양과 중태평양의 강수, 즉 두 지역의 대류활동을 모두 고려할 때 우리나라 겨울 기온을 더 많이 설명할 수 있음을 보여준다. 따라서 가을철 해수면온도 경향의 동서경도 예측인자는 적도 태평양 해수면온도의 경향을 고려됨에 따라 겨울철 엘니뇨/라니냐로의 발달의 가능성을 지수에 좀 더 반영할 수 있고 동서방향 경도를 계산함에 따라 우리나라에 중요한 서태평양의 해수면온도의 변동이 지수에 반영되어 우리나라 1월 기온과 상관성이 높게 나타난 것으로 생각된다.

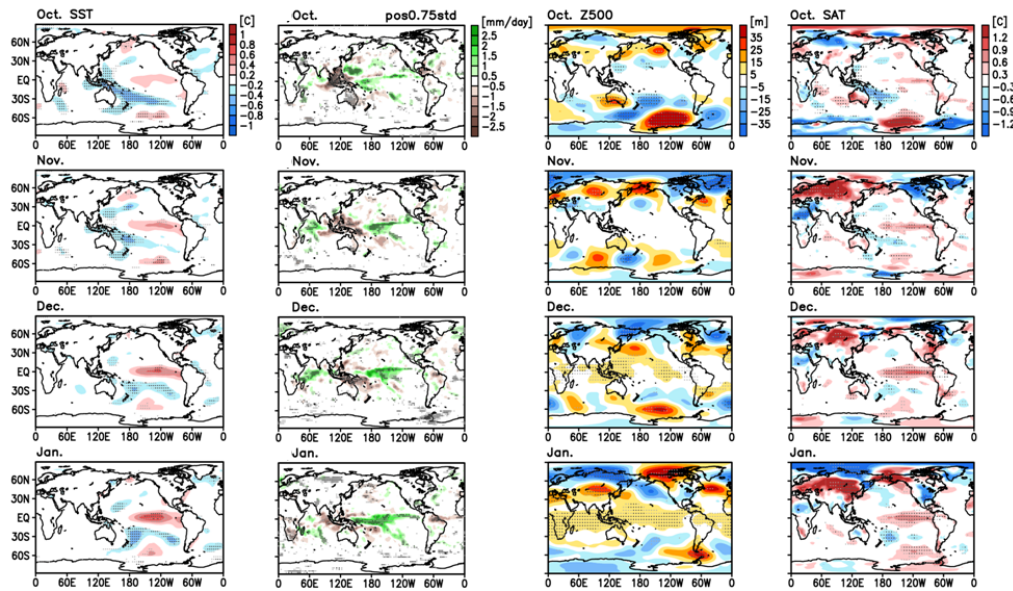


Figure 4.2.6 Composite map of the SST(the first column), precipitation (the second column) and geopotential height anomalies at 500 hPa and SAT(the third and fourth column) in the years when the zonal gradient of SST tendency(Oct.-Sep.) in tropical Pacific is larger than its +0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

실제로 어떤 순환장 패턴이 우리나라 기온 변동에 영향을 미치는지 확인하였다 (Fig. 4.2.6). 1월 대류권 하층 패턴(not shown)은 전형적인 엘니뇨 반응을 보여주고 상층 순환장을 보면 열대 서태평양에서부터 북미까지 파동 패턴이 나타나고 이 파동 패턴과 연관되어 우리나라 동쪽에는 고기압성 순환이 나타나게 된다. 이러한 우리나라 주변 상층 순환장 패턴에서는 동아시아 기압골이 약화되어 기온이 평년보다 높은 경향이 나타난다.

지수가 음으로 강할 때(Fig.4.2.7)에는 양으로 강할 때와 반대의 경향이 나타나지만 라니냐와의 연관성은 다소 약해 보이고 순환장 패턴에서도 전반적으로 지수가 양으로 클 때와 대칭적인 패턴을 보여주지만 1월 우리나라와 동아시아 지역 주변의 상층 지위고도에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다. 이는 기본적으로 이 예측인자가 엘니뇨만큼 뚜렷하게 라니냐의 신호를 보여주지 못하기 때문에 그와 연관된 서태평양 대류활동도 상대적으로 약할 가능성이 있다. 이 뿐만 아니라 3.3.1절에서 언급된 것처럼 엘니뇨/라니냐의 다양성에 따른 Inter-El Niño/La Niña spread의 영향으로

라니냐 때가 엘니뇨 때에 비해 서태평양에서의 대류활동의 변동이 강하기 때문에 즉, 서태평양의 대류활동 변화가 일정하기 못하기 때문에 우리나라에도 뚜렷한 영향을 보이지 못하는 것도 연관되어 있는 것 같다. 이렇게 예측인자의 위상에 따라 영향의 크기에 다소 비대칭성이 있지만 역학적인 관련성이 뚜렷하여 예측인자로 활용하였다.

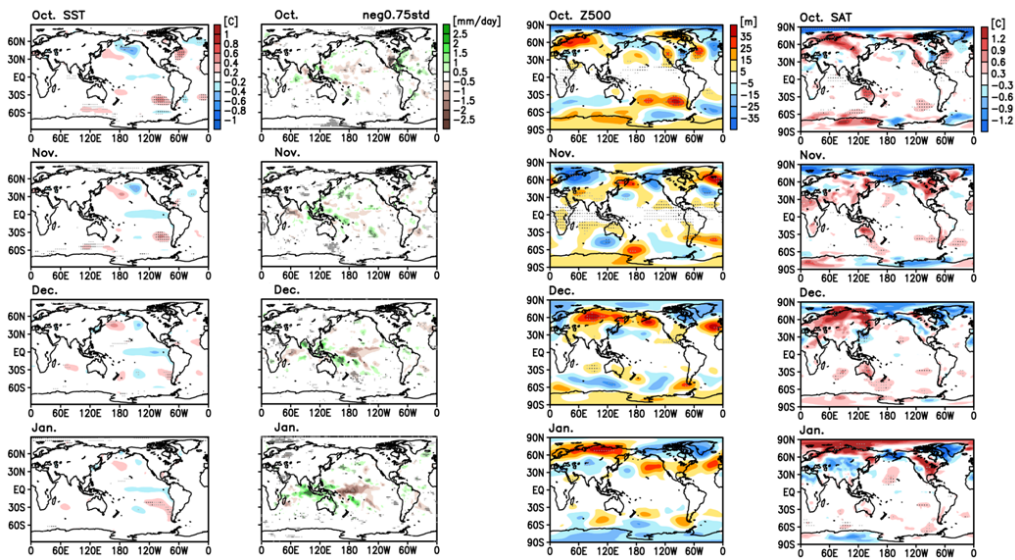


Figure 4.2.7 Same as Figure. 4.2.6 but for in the years when the zonal gradient of SST tendency(Oct.-Sep.) over the tropical Pacific is smaller than its -0.75 standard deviation.

4.2.1.3 타미르반도 상층 지위고도

우리나라 1월 기온과 상층 순환장 사이의 지연상관성을 계산하면 10월 타미르반도 부근($80^{\circ} \sim 120^{\circ}E$, $70^{\circ} \sim 80^{\circ}N$) 상층 지위고도와 강한 음의 상관성이 나타난다. 하지만 11월에는 상관성이 전혀 나타나지 않는다. 대류권 순환장은 일반적으로 메모리가 매우 짧기 때문에 계절 예측인자로 활용하기가 어려운 측면이 있다. 하지만 시간 지연에 대한 명확한 역학적 설명이 가능하다면 사용할 수 있다고 판단된다. 선행연구(Kryjov 2015; Kryjov and Min 2016)에서는 10월 타미르반도의 순환장이 성층권 극소용돌이와 연관되어 대류권 겨울철 AO와 깊게 연관되어 있음을 제시하고 있다. 이 지역에서의 양의 지위고도 편차가 존재하면 행성파는 연직전파가 증가하고 성층권의 극소용돌이를 약화시켜 성층권 극지역에 양의 지위고도 편차를 유도하게 된다. 성층

권의 양의 지위고도편차는 지속적으로 대류권에 영향을 끼치며 음의 AO 형태의 순환장을 유도하게 된다.

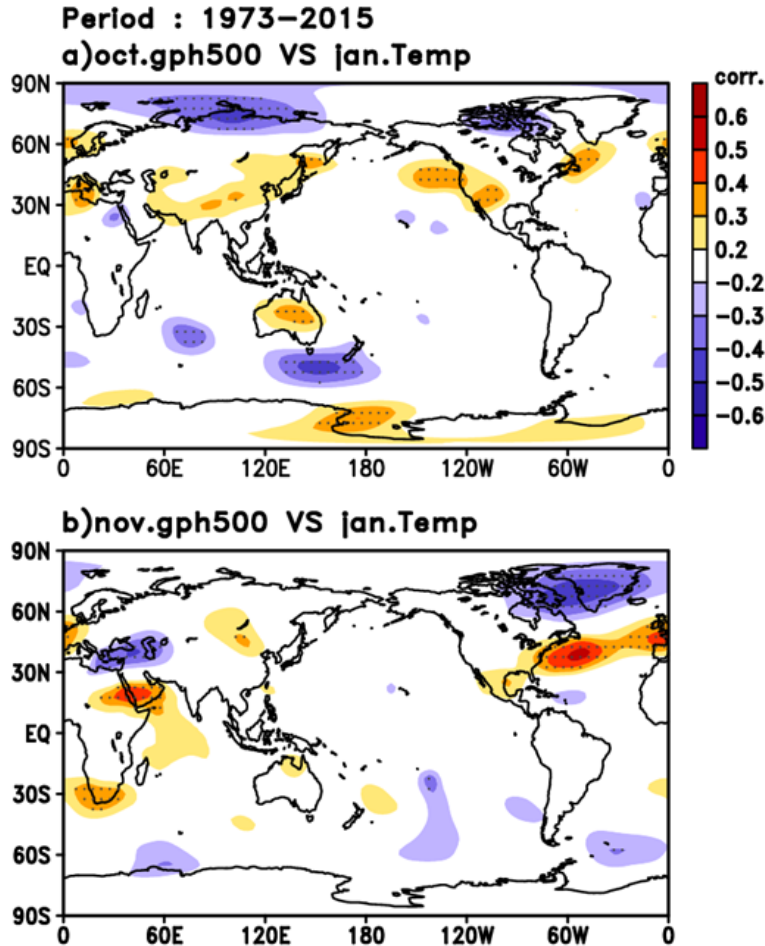


Figure 4.2.8 Lag-correlations between the the geopotential height in October/November and SAT in the Korean Peninsula in January.

이러한 타미르반도와 연관된 성층권-대류권 커플링은 타미르반도 지위고도 편차 지수의 강약에 따른 합성분석에서도 뚜렷하게 나타난다. 타미르반도에 양의 지위고도 편차가 강했을 때(Fig. 4.2.9) 12월 성층권에서는 북극을 중심으로 양의 지위고도와 음의 지위고도가 쌍극자(dipole) 형태를 이루어 성층권 극소용돌이를 약화된 특징을 보여준다. 1월이 되어서는 강한 양의 지위고도 편차가 북극권 전체에 강하게 나타

나고 이는 대륙권까지 영향을 미쳐 음의 AO 형태의 순환장이 강하게 나타나 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 뚜렷한 음의 기온 편차를 보여준다.

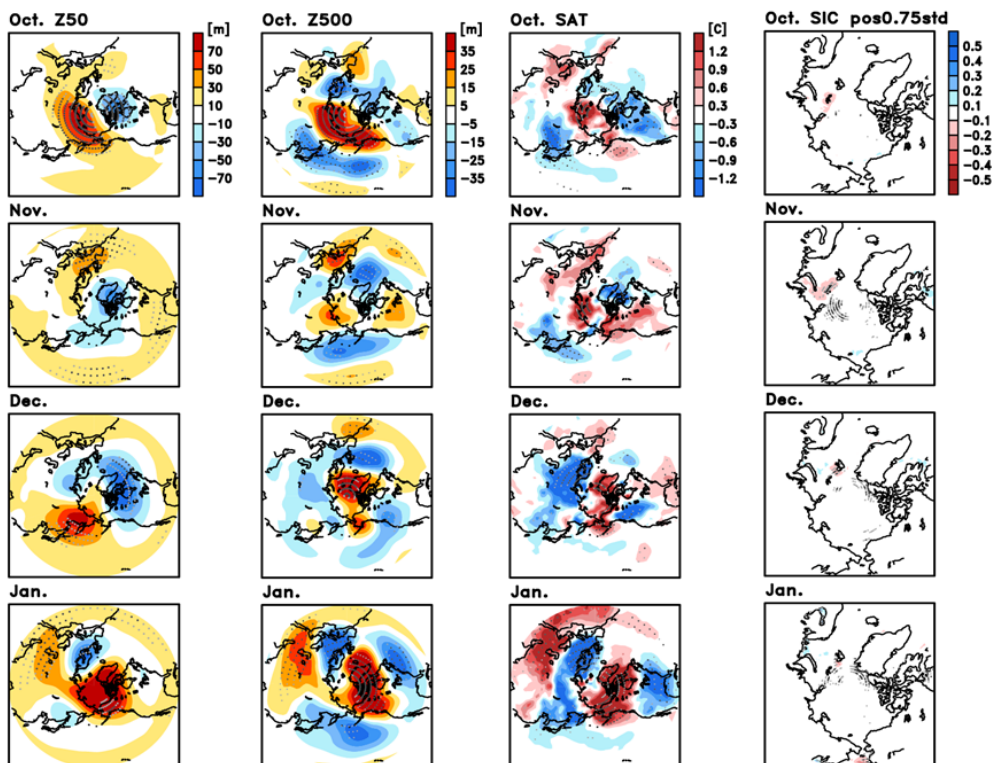


Figure 4.2.9 Composite map of the geopotential height at 50 hPa(the first column),at 500 hPa(the second column) and SAT and SIC anomalies (the third and fourth column) over the Northern Hemisphere the years when the geopotential height anomaly at 500 hPa over the Tamyр Peninsula region is larger than its +0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

반대로 타미르반도에 음의 지위고도 편차가 강했을 경우(Fig. 4.2.10)에는 1월 성층권과 연관된 양의 AO 패턴이 나타나며 우리나라는 평년보다 따뜻한 기온을 보였다.

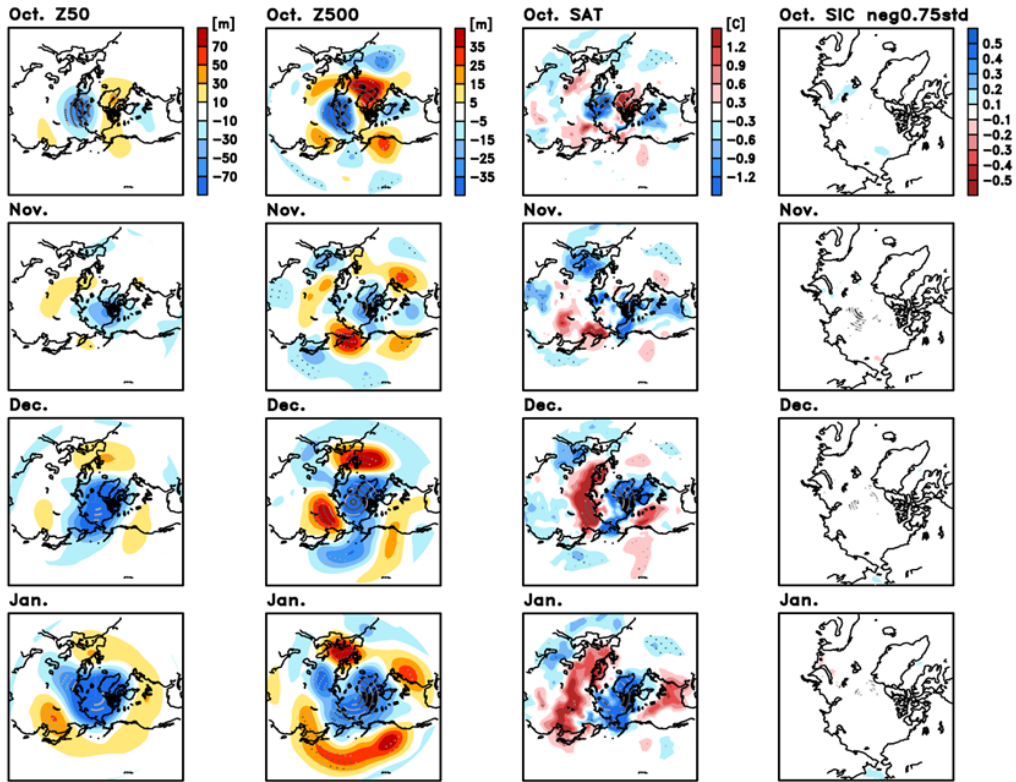


Figure 4.2.10 Same as Figure 4.2.9 but for in the years when the geopotential height anomaly at 500 hPa over the Tamyr Peninsula region is smaller than its -0.75 standard deviation.

이러한 물리-역학적 설명은 앞서 4.2.1.1절에서 제시한 10월 카라 해 해빙이 적을 때 우리나라 1월 기온이 낮은 경향을 보이는 것과 매우 유사하다. 이는 두 인자가 서로 연관성이 있을 가능성 또는 다른 변수지만 같은 현상을 보여주는 것을 의미할 수 있다. 만약 서로 연관성이 높다면 통계예측 모델에서의 과적합(Overfitting) 문제 즉, 극지역의 예측인자에 과한 기여도를 부과하는 문제를 발생시킬 수 있어 둘 중 한 예측인자는 모델에 사용하기가 어렵다. 따라서 10월 타미르반도 순환장과 카라 해 해빙 인자가 서로 연관되어 있는지를 아는 것은 매우 중요하다. 먼저 10월 카라 해 해빙과 타미르반도 사이 예측인자 사이에 상관성을 계산하면 -0.26 으로 다소 높은 측면이 있지만 95% 신뢰도를 만족하지는 못한다. 그리고 결정적으로 10월 타미르반도 지위 고도가 강한(약한) 해의 북극 해빙농도가 적은(많은) 경향이 아주 약하게 나타나지만 통계적으로 유의하지 않다. 즉, 10월 타미르반도의 상층 지위고도는 10월 카라 해 해

빙과 유사하게 성층권을 통해 시간 지연을 가지고 우리나라에 영향을 미치지만 다른 매개체를 이용하는 것으로 판단된다. 한 가지 추정되는 것은 유라시아 눈덮임면적이다. 10월 타미르반도 상층에 지위고도가 높을 경우, 11월과 12월 유라시아 대륙의 $40 \sim 55^{\circ}\text{N}$ 지역에서는 전반적으로 음의 지위고도 편차가 뚜렷하다(Fig. 4.2.9). 따라서 이 위도대에서 강수가 많을 가능성이 있으며 이 위도 대는 초겨울 이미 영하의 기온을 보이므로 눈으로 내려 쌓일 가능성이 높아 유라시아 대륙에 가을철 눈덮임이 빨리 진행될 가능성 높다. 실제로 10월 타미르반도의 고기압성 순환이 강할 때 눈덮임면적 편차를 보면(Fig. 4.2.11), 11월과 12월 유라시아 대륙 눈덮임이 많은 경향이 있다. 즉 이러한 눈덮임과 연관된 순환장이 행성파의 연직전파의 강화와 연관되어 있을 가능성이 있다. 또한 10월 카라 해 해빙이 많이 녹았을 때(Fig. 4.2.2)와 타미르반도에 고기압성 순환이 강할 때의 순환장(Fig. 4.2.9)을 비교하면 상당히 다른 특징이 보여준다. 10월 카라 해 해빙이 많았을 때 11월과 12월에 유라시아 대륙 중북부에는 고기압성 편차가 강하지만 10월 타미르반도의 고기압성 순환이 강할 때는 저기압성 편차가 뚜렷하다. 따라서 10월 타미르반도 순환장 예측인자는 해빙이 아니라 눈덮임과 연관된 순환장의 변화를 통해 성층권 극소용돌이에 영향을 미치고 다시 대류권에 영향을 주는 것으로 판단된다. 이러한 근거 하에 본 연구에서는 1월 기온 예측을 위해 10월 타미르 반도 지위고도와 10월 카라 해 해빙농도를 모두 예측인자로 사용하였다.

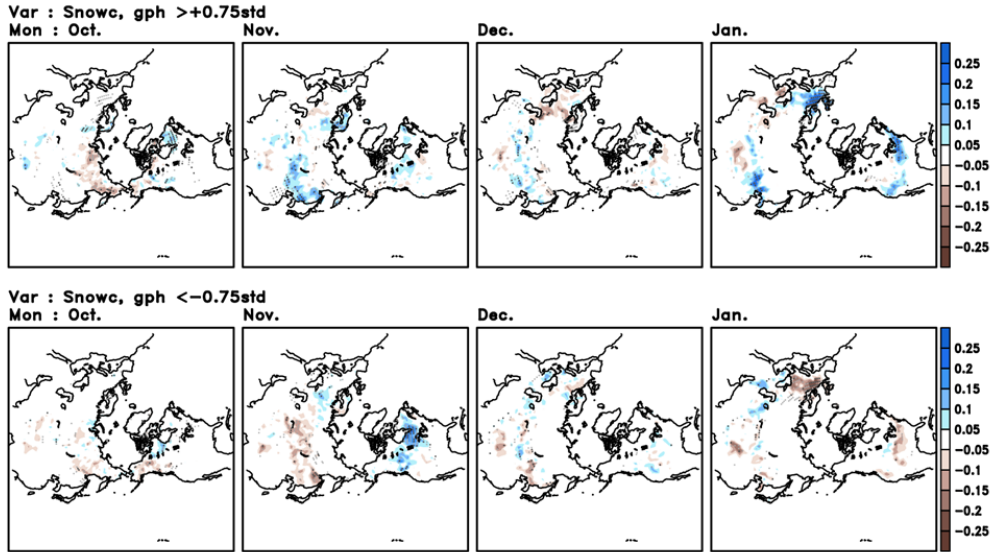


Figure 4.2.11 Composite map of the snowcover extent anomalies over the northern hemisphere in the years when the geopotential height at 500hPa over the Tamyr Peninsula in October is larger(smaller) than its $+0.75(-0.75)$ standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

4.2.2 1월 기온 통계예측 모델 및 검증

선행연구와 본 연구에서의 분석을 통해 우리나라 1월 기온과의 물리-역학적으로 상관성이 나타나는 3개의 예측인자를 선정하였다. 인자 간 상관성을 조사한 결과 (Table 4.2.1), 10월 타미르반도 상층 지위고도와 카라 해 해빙 사이에 약한 음의 상관성(-0.26)이 나타나지만 95% 수준에서 통계적으로 유의하지는 않았다. 뿐만 아니라 앞서 설명하였듯이 10월 타미르반도 지위고도 인자는 해빙과 연관되었다기보다는 눈 덮임과 연관되어 있을 가능성이 높다고 판단되어 예측인자로 활용하였고 세 가지 예측인자와 우리나라 1월 기온 사이의 다중선형 회귀 분석을 통해 통계예측 모델을 구축하였다(식 4.2).

$$SAT_{pred-Jan} = 0.41 * SIC_{kara} + 0.61 * ENSO_{like} - 0.48 * Z500_{Tamyr} \quad (4.2)$$

* 우리나라 기온과 예측인자들의 선형추세는 제거되었음

Table 4.2.1 Correlations coefficients between the SAT over the Korean Peninsula in January and the predictors. And correlation coefficient among the predictors for the SAT. Symbol '**(*)' indicates the value which is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

변수	10월 카라 해 해빙농도	적도 태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)의 동서경도 (동태평양-서태평양)	10월 타미르반도 Z500
1월 우리나라 기온	0.46**	0.50**	-0.42**
10월 카라 해 해빙농도		0.22	-0.26
적도 태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)의 동서경도 (동태평양-서태평양)	×		-0.12
10월 타미르반도 Z500	×	×	

통계 모델이 예측한 우리나라 1월 기온과 관측 기온 사이의 상관계수는 0.66으로 매우 높지는 않지만 현업예측에 정보를 제공해 줄 정도의 준수한 상관성을 보여준다고 생각한다(Fig. 4.2.12). 1월 기온 예측 모델이 얼마나 안정적으로 예측을 수행하는 조사하기 위해 12월 기온 예측 모델에서와 같이 두 가지 교차검증 방법(Conv_CV와 Odd_Even_CV)을 사용하여 테스트하였다(Fig. 4.2.13). Conv_CV의 경우, 관측과의 상관계수는 0.59였고 교차검증 중 다중회귀 계수의 변화도 거의 없는 것으로 보아(Fig. 4.2.13) 특정 해의 영향이 크게 반영되지 않고 안정적인 예측수행이 가능한 것으로 판단되었다. 동아시아 몬순의 2년 주기를 고려한 Odd_Even_CV를 시행하였을 경우, 0.55를 보여 두 가지 방법에서 모두 큰 상관성의 감소 없이 통계적 유의성을 유지하였다. 하지만 기본적으로 각각의 예측인자와 우리나라 1월 기온 사이의 상관성이 12월에 비해 낮기 때문에 다중선형 회귀를 이용해서 예측성을 향상시키는 것은 한계가 있었다. 예측성 향상을 위해서는 상관성 높은 예측인자를 찾는 것이 중요할 것으로 보인다.

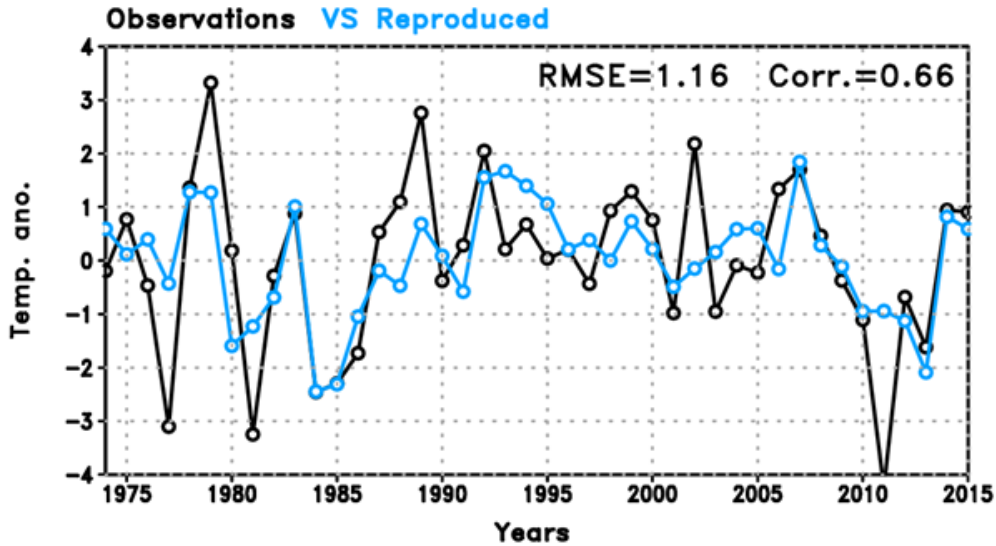


Figure 4.2.12 Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in January(Black circle line) and the reproduced SAT by the statistical model based on the predictors(Blue circle line). RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

앞서 12월에서 제시한 것처럼 통계 모델의 오차를 만들어 내는 훈련기간 동안의 우리나라 1월 기온과 예측인자 간의 상관성의 변화를 조사하였다(Fig. 4.2.14). 분석 기간 전체에 대해서는 통계적으로 유의한 상관성이 나타나지만 훈련기간 동안 21년 윈도우로 예측인자와 1월 기온사이의 이동 상관성을 보면 타미르반도 상층 지위고도 인자는 윈도우에 상관없이 지속적으로 0.4 ~ 0.5 사이의 상관계수를 유지하지만 10월 카라 해 해빙농도와 적도 태평양 인자는 1990년대를 중반을 중심으로 상관성이 큰 폭으로 떨어져 1995 ~ 97년 중심으로는 1월 기온과 상관성이 전혀 없는 것으로 나타났다. 이러한 상관관계의 변화와 예측인자의 선형 회귀 계수의 불일치가 있을 때 예측성의 오차가 커질 가능성이 있다. 실제 예측 기온과 관측 기온의 시계열(Fig.4.2.14)을 비교하면 1990년대에 오차의 크기는 작지만 지속적으로 오차가 나타나는 경향이 있는 것은 이러한 예측인자와 1월 기온 사이의 상관성이 변하는 것과 연관이 있어 보인다.

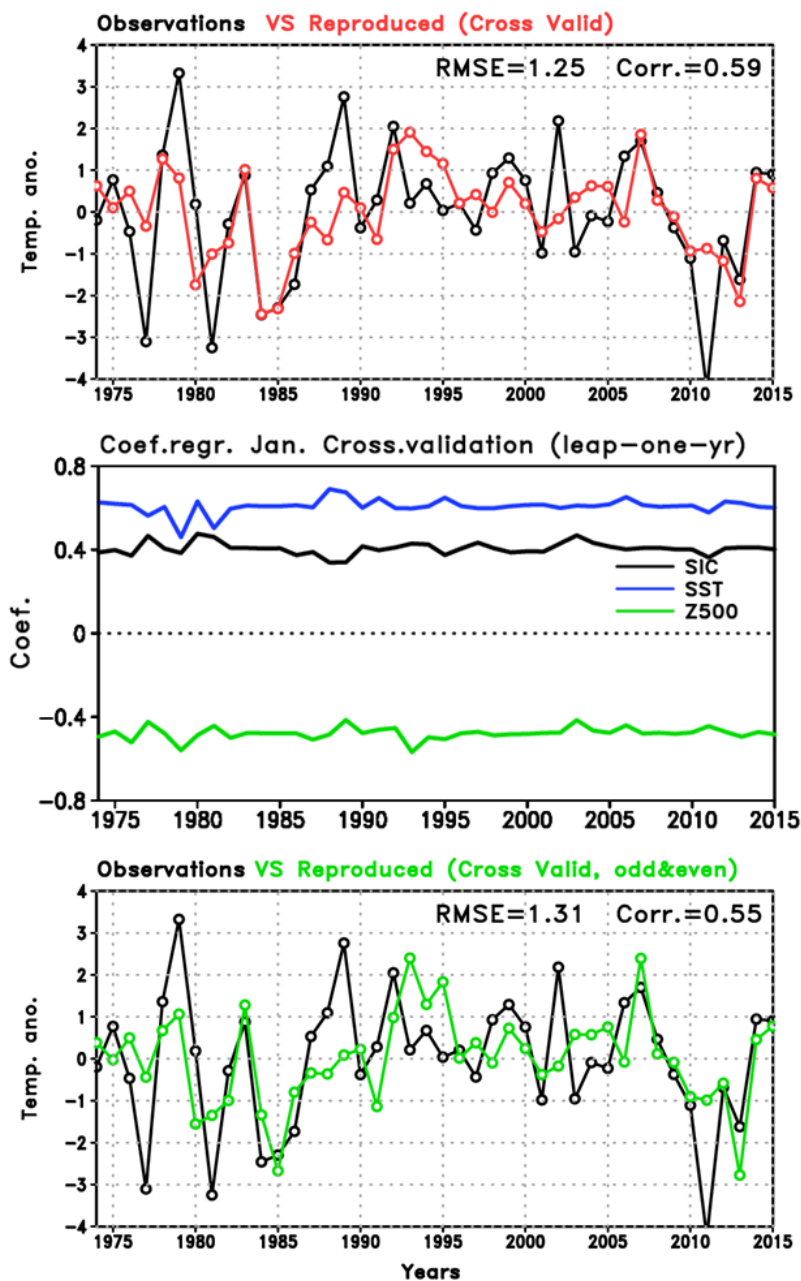


Figure 4.2.13 (Upper row) Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in December and the SAT(Black circle line) in the cross validated hindcast prediction by the conventional leave-one-out cross validation(Conv. CV). (Middle row) Variation of multiple regression coefficients of the predictors in leave-one-out cross validation. (Lower row) same as the upper row but for Odd&Even CV. RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

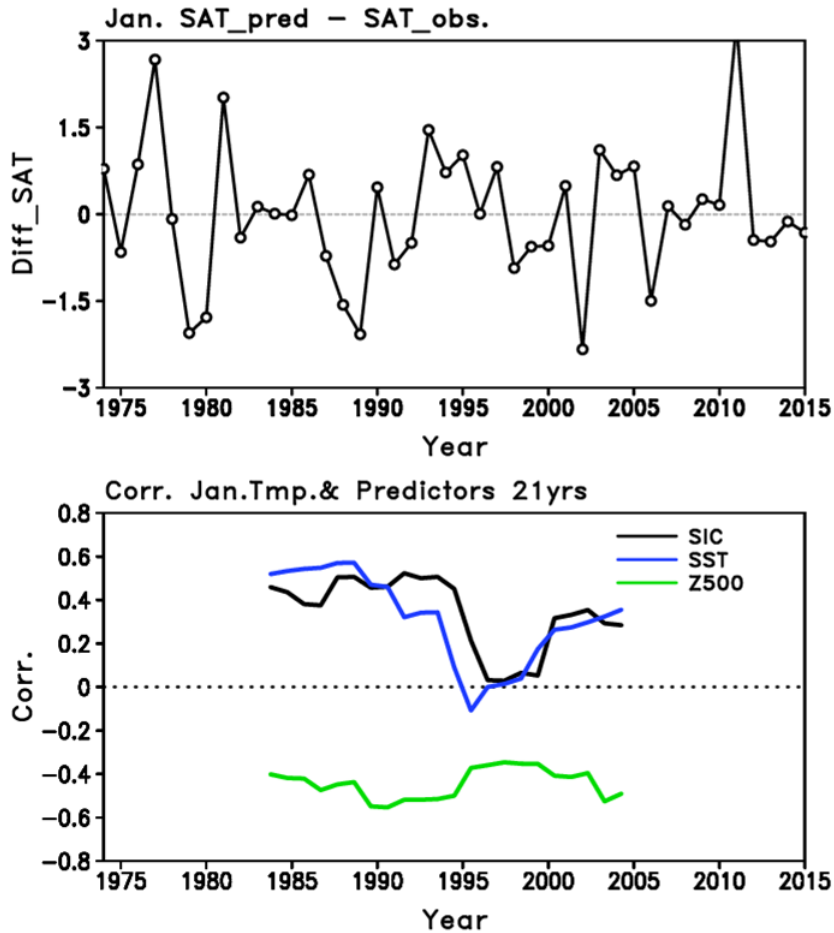


Figure 4.2.14 (Upper row) Deviation of the predicted SAT from the observation SAT in January. (Lower row) Running correlation with 21-year window between the SAT in January and its predictors during 1973~2015.

1월 예측 모델의 오차를 만들어내는 특정 순환장 패턴이나 기후인자의 존재를 조사하기 위해 양으로 오차가 큰 경우와 음으로 오차가 큰 경우를 나누어 순환장과 해빙농도 그리고 해수면온도에 대해 합성분석을 수행하였다(Fig. 4.2.15). 하지만 오차와 연관된 해수면온도와 해빙농도 합성장이 양으로 오차가 큰 경우와 음으로 오차가 큰 경우에 서로 대칭되지 않고 오히려 유사한 패턴을 보여 예측 기온에서 오차가 발생하는 원인을 특정 예측인자가 설명하는 순환장과 그에 따른 우리나라 기온 변동의 문제로 연결하기는 어려웠다. 단, 북대서양에서 유라시아 대륙을 거쳐 우리나라까지 나타나는 파동 형태의 순환장 패턴은 12월에서와 같이 매우 유사하게 나타난다. 전반

적으로 동아시아 겨울몬순과 연관된 변동성을 예측인자들이 완전히 설명할 수 없기 때문에, 특히 북대서양 해수면온도와 연관되어 유발된 원격상관에 대한 우리나라 기온 변동을 설명하지 못하여서 유라시아 대륙에 걸쳐 뚜렷한 순환장의 편차가 나타나는 것으로 판단된다.

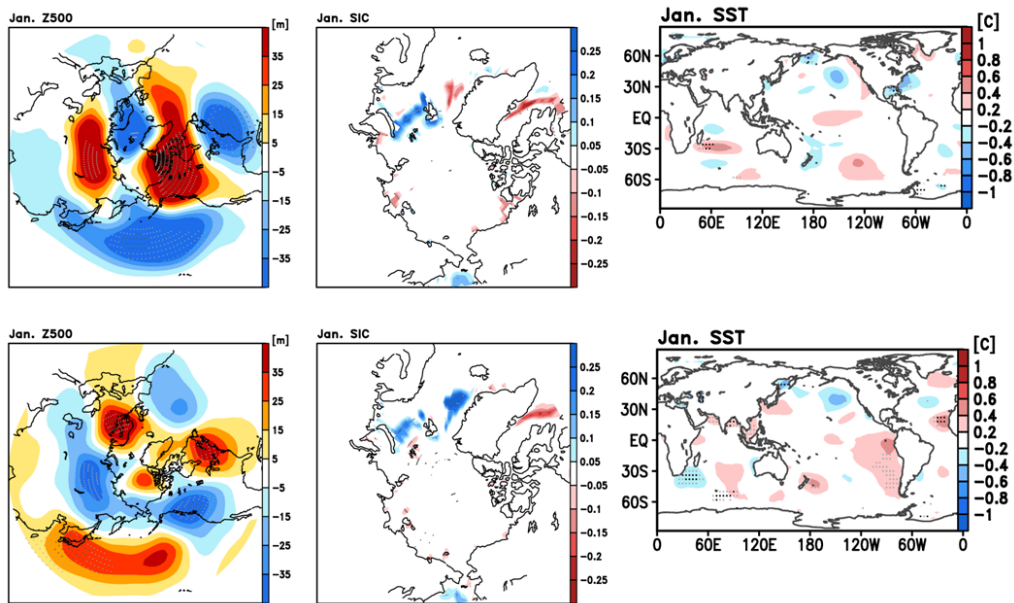


Figure 4.2.15 Composite map of the geopotential height, SIC and SST anomalies over the northern hemisphere in the years when the difference between observational SAT and predicted SAT in January is larger(smaller) than its $+0.75(-0.75)$ standard deviation in upper(lower)-row. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

관측과 예측 기온 사이의 차이(Fig. 4.2.14)를 보면 몇몇 해에서 매우 큰 오차를 보이는데, 오차를 유발한 원인에 대한 상세 분석이 수행되었다(1977년과 2011년 : 약 $+3$ 도 정도의 오차, 2002년 : -2 도 이상의 오차). 2002년 1월은 예측인자인 가을철 적도 태평양 해수면온도 경향의 동서경도와 타미르반도 500hPa 지위고도는 뚜렷한 시그널이 없었고 10월 카라 해 해빙이 평년보다 적었기 때문에(Table 4.2.2) 모델은 약한 음의 기온 편차를 예측하였다. 하지만 실제 관측 기온은 강한 양의 기온을 보여 오차가 음으로 매우 컸던 사례이다. 앞서 제시된 것처럼 가을철 카라-바렌츠 해 해빙이 적으면 1월과 2월 성층권 극소용돌이 약화와 관련하여 대류권 음의 AO가 발생하

는 경향이 있음을 제시하였다. 실제 이 케이스에도 12월 말 성층권에서는 돌연승온이 발생하였지만 1월에 대류권에 영향을 미치지 못하였던 것으로 분석되었다. 이런 상황에서 우리나라의 풍상측인 우랄 산맥 부근에는 저기압성 순환이 자리 잡고 있는 상태에서 우리나라 상층에는 고기압성 순환이 덮어 평년보다 매우 높은 기온을 기록하였다(Fig. 4.2.16). 이 모델에 사용된 10월 카라 해 해빙 예측인자의 현황이 성층권 돌연승온과 연관된 음의 기온편차에 기여하지만 실황은 대류권 커플링이 발생하지 않아 큰 오차가 유발된 것으로 판단된다.

2011년 1월의 경우에는 한 달간 우랄 산맥 부근에서는 고기압성 편차가 블로킹처럼 유지되었고 북시베리아 지역에서도 고기압성 편차가 지속적으로 유지되면서 우리나라 상층에는 저기압성 편차가 한 달간 지속되어 지상기온 실황은 평년보다 크게 낮았다(Fig. 4.2.17). 통계 모델에서도 세 예측인자가 모두 음의 기온을 예측하는데 기여하여(Table 4.2.2) -1°C 정도의 음의 기온 편차를 예측하였지만, 실제 관측은 그보다 더 크게 기온이 낮으면서 큰 음의 오차(약 $+3$ 도)를 기록하였다. 2011년 1월은 42년의 분석 기간 중 가장 낮은 기온편차를 기록한 해이고 특히, 하루를 제외하고는 1월 내내 음의 기온 편차를 기록한 이례적인 사례이다. 예측인자가 설명할 수 있는 기온 변동이외에 블로킹과 같이 예측이 힘든 계절 내 진동이 실황에서 크게 영향을 미쳐 통계 모델의 오차가 발생한 것으로 판단된다.

Table 4.2.2 Normalized values of predictors for the SAT over the Korean Peninsula in January, 2002 and 2007.

정규화된 1월 예측인자 값	10월 카라 해 해빙농도	적도 태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)의 동서경도 (동태평양-서태평양)	10월 타미르반도 Z500
2002	-0.38	+0.05	+0.05
2011	-0.57	-0.76	+0.61

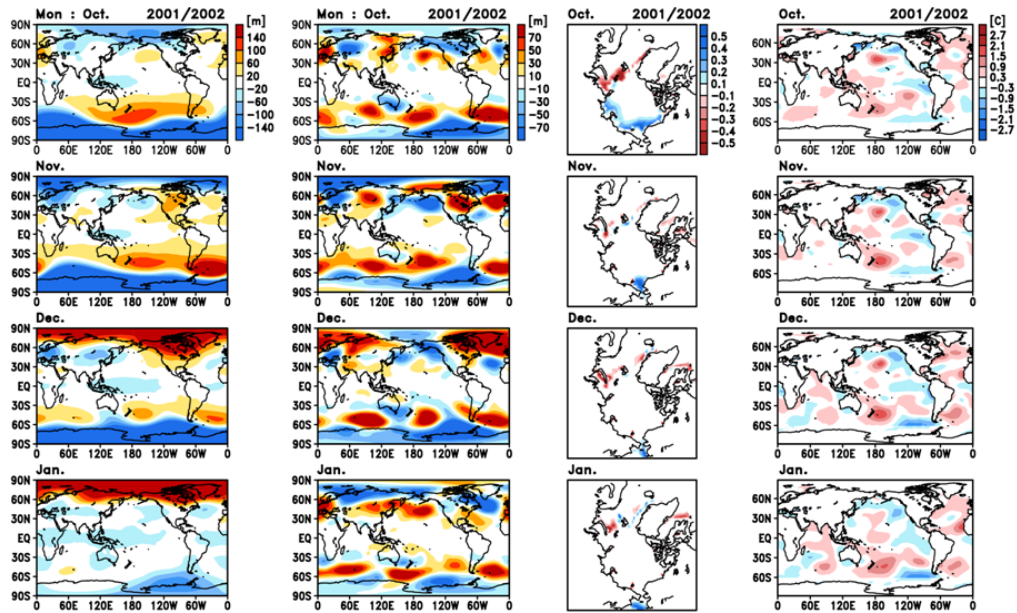


Figure 4.2.16 The geopotential height at 50 hPa(the first column),at 500 hPa(the second column), SIC and SST anomalies (the third and fourth column) during October 2001 to January 2002

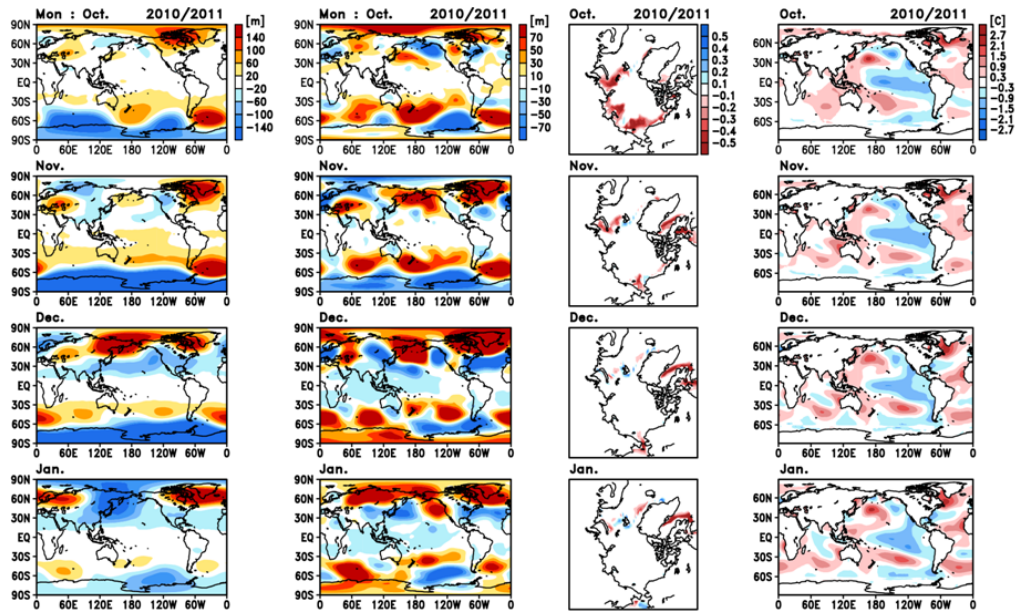


Figure 4.2.17 Same as Figure 4.2.16 but for during October 2010 to January 2011.

4.3 2월 기온 예측

4.3.1 2월 기온 예측인자

4.3.1.1 10월 바렌츠(Barents) 해 해빙농도

우리나라 2월 기온 예측을 위해 가을철 해빙농도의 예측인자 사용 가능성을 조사하였다. 그림 4.3.1은 우리나라 2월 기온과 가을철 해빙농도 사이의 상관성을 보여준다. 9월과 10월 모두 바렌츠 해 및 랍테프 해 지역에서 통계적으로 유의한 상관성이 나타나는 것을 확인하였다. 앞서 1월 예측인자에서도 제시되었듯이(4.2.1절) 가을철 카라-바렌츠 해 해빙이 적으면 성층권 극소용돌이를 약화시킬 수 있고 이것이 다시 대류권 음의 AO를 유도하여 시간 지연을 가지고 우리나라 늦겨울에 평년보다 낮은 기온을 만드는 경향이 있다(Kim et al. 2014; Mori et al. 2014). 따라서 본 연구에서는 10월 바렌츠 해($25 \sim 55^{\circ}\text{E}$, $78 \sim 82^{\circ}\text{N}$) 지역의 해빙을 평균하여 지수를 정의하고 실제 우리나라 2월 기온에 어떻게 영향을 미치는지 조사하였다(우리나라 2월 기온과의 상관계수 : 0.43).

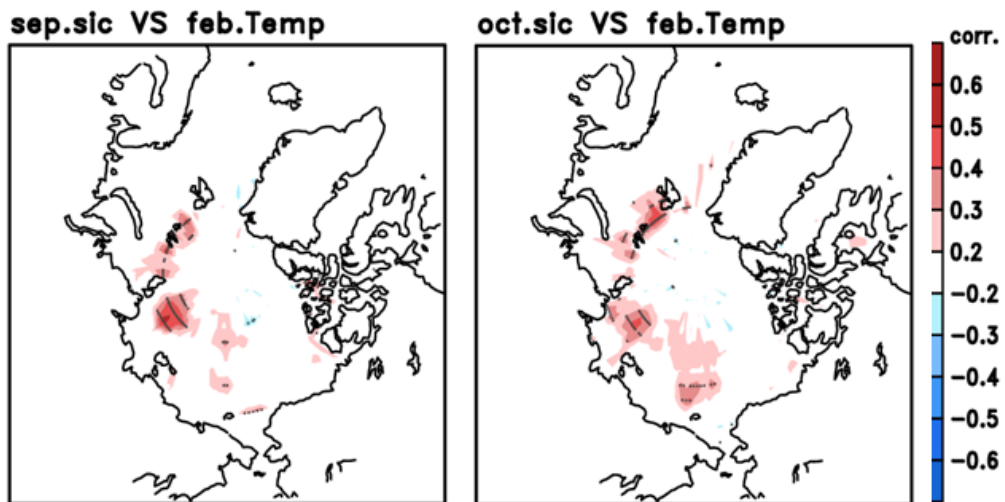


Figure 4.3.1 Lag-correlations between the autumn season(September and October) SIC over the Arctic and the SAT in the Korean Peninsula in February.

10월 바렌츠 해에 해빙이 평년보다 적으면(Fig. 4.3.2) 11월과 12월까지 해빙이 적은 경향이 뚜렷하다. 1월과 2월에는 초겨울에 비해서 해빙농도의 양과 면적이 뚜렷한 시그널은 아니지만 전반적으로 해빙이 적은 경향이 있다. 카라-바렌츠 해에서 가을철 많이 녹은 해빙이 그 메모리로 2월까지 해빙이 적으면 우랄 산맥 부근에 고기압성 순환이 발달하기 좋고 그 풍하측인 동아시아와 우리나라 부근에는 기압골이 발달해 평년보다 낮은 기온이 나타난다(Honda et al. 2009; Sun et al. 2016). 실제 10월 바렌츠 해 해빙이 적을 때의 1월과 2월 대류권 상층 패턴을 보면 우랄 산맥 부근 고기압과 우리나라와 동아시아 지역에 저기압성 편차가 뚜렷하다. 즉 10월 적은 해빙의 메모리에 의해 우리나라 2월 기온에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 10월 바렌츠 해 해빙이 적을 때 2월의 해빙이 적은 경향이 매우 뚜렷한 것은 아니기 때문에 이러한 해빙의 메모리에 의해 우리나라 2월 기온이 낮은 것을 모두 설명하기에는 무리가 있어 보인다.

10월 바렌츠 해 해빙이 적을 때 성층권 순환장을 보면 12월과 1월에 극지역에는 음의 편차와 양의 편차가 갈라져서 극소용돌이를 약화시키는 패턴을 보여준다. 12월에는 극지역이 양의 지위고도 편차가 뚜렷하고 대류권에서도 전반적으로 극지역에 양의 지위고도, 중위도에는 음의 지위고도가 나타나 음의 AO와 유사한 패턴을 만드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 선행연구(Kim et al. 2014; King et al. 2015; Nakamura et al. 2016)에서 제시된 것과 매우 유사하며 우리나라의 기온이 평년보다 낮을 수 있는 호조건을 제공한다.

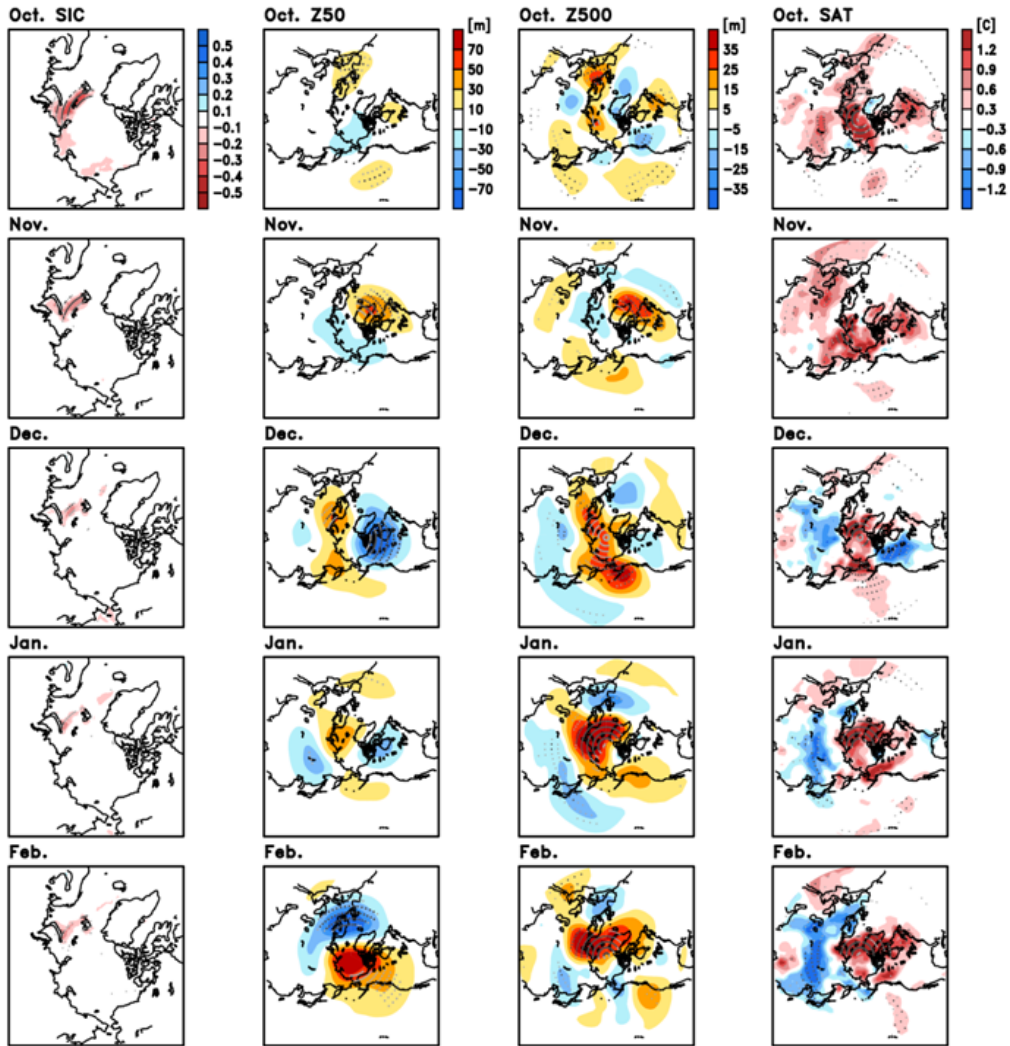


Figure 4.3.2 Composite map of the SIC(the first column), SAT (the second column) and geopotential height anomalies at 500 and 50 hPa (the third and fourth column) over the Northern Hemisphere in the years when SIC anomaly over the Barents sea in October is smaller than its -0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

10월 바렌츠 해 해빙이 많은 경우에는 북반구 전반적으로는 바렌츠 해 해빙이 적은 경우와 반대되는 결과를 보인다(Fig. 4.3.3). 11월과 12월까지 해빙이 많은 것이 뚜렷하고 1월과 2월에 성층권 극 지역에서 강한 음의 지위고도 편차, 즉 성층권 극소용돌이가 평소보다 매우 강해진 특징이 나타난다. 이러한 성층권 순환장은 대류권과

커플되어 있고 중국 동북쪽과 시베리아 지역에는 양의 지위고도 편차가 나타나 그 지역에서 양의 기온 편차가 나타난다. 하지만 우리나라 부근에는 양의 기온 편차가 뚜렷하지는 않다.

10월 바렌츠 해 해빙감소와 연관된 우리나라 기온의 경향이 다소 비대칭적인 측면이 있지만 해빙과 연관된 유라시아 대륙에서의 순환장이나 동아시아 기온 미치는 영향이 서로 대칭되는 것을 고려하여 예측인자로 활용하기로 하였다.

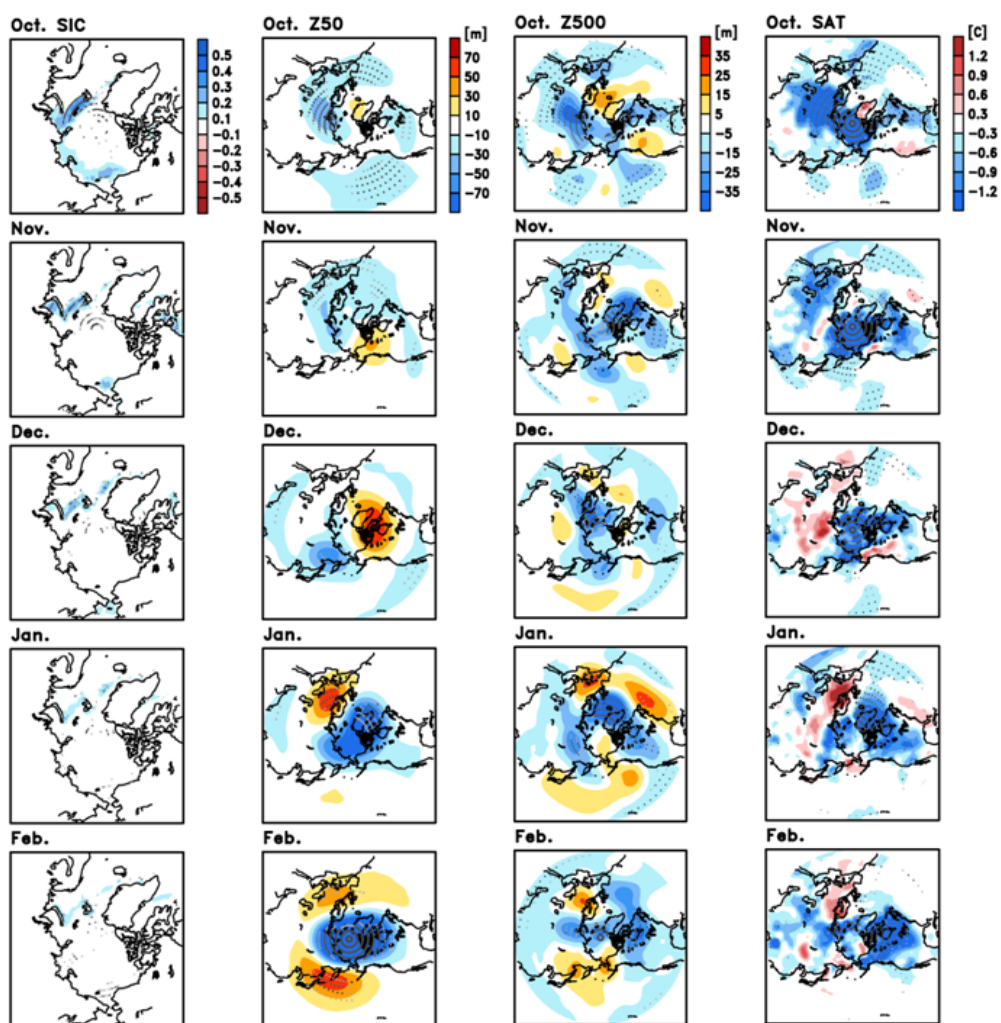


Figure 4.3.3 Same as Figure. 4.3.2 but for in the years when SIC anomaly over the Barents sea in October is larger than its +0.75 standard deviation.

4.3.1.2 가을철 호주 북쪽 해수면온도 경향

우리나라 2월 기온과 가을철 해수면온도와 직접적인 상관성을 조사하면 태평양에서는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않지만, 9월과 10월 사이의 기온 경향과는 서태평양 특히 호주 북쪽 지역($130 \sim 160^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$)에서 뚜렷한 음의 상관성이 나타난다(상관계수 : -0.52).

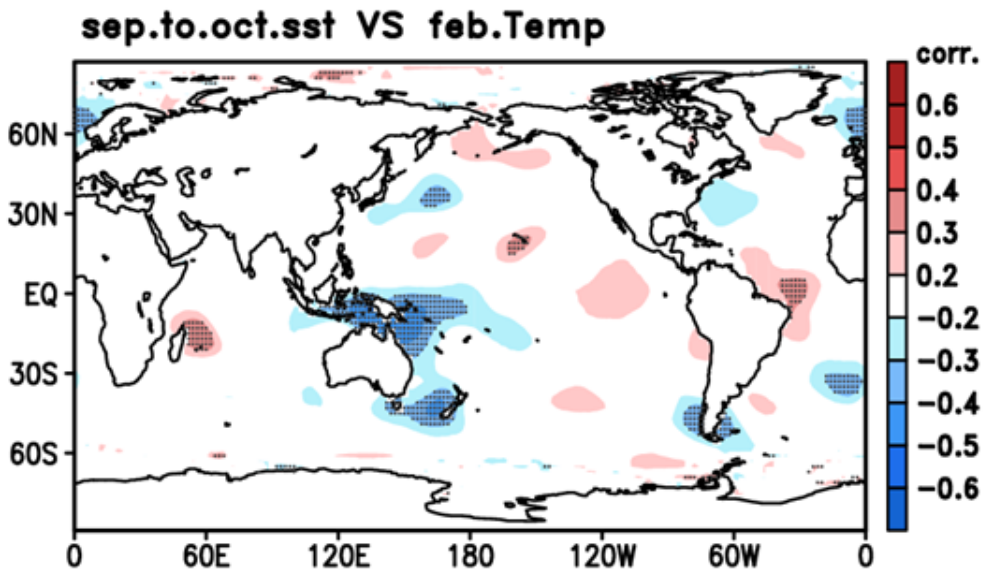


Figure 4.3.4 Lag-correlations between the SST tendency(October - September) and the SAT in the Korean Peninsula in February.

이 지역 해수면온도는 지역적인 대류활동 및 순환장과 연관되고 있어서 엘니뇨/라니냐 발달과 연관된 적도 동서바람 바람장에도 밀접하게 연관되어 있을 가능성이 있다(Cai and Cowan 2009; Yu et al. 2003; Feng et al. 2016). 실제 가을철 호주 북쪽의 해수면온도가 9월에서 10월로 갈 때 증가하는 경향일 경우(Fig. 4.3.5)에는 그 지역 하층에서 저기압성 편차가 발달해 있고 적도 지역에서는 동풍을 강화시켜 워커 순환에 영향을 주어 적도 중태평양에서 하강기류를 유도하고 서태평양에서는 수렴을 통한 상승기류를 유발할 수 있는 순환장 패턴을 보여준다. 실제로 대류활동과 밀접하게 연관된 강수패턴을 보면 가을철부터 중태평양에서는 강수가 억제되고 서태

평양에서는 강수가 증가하며 이러한 특징은 겨울철에 뚜렷하게 나타난다. 이러한 강수 패턴은 라니냐가 발달한 겨울철 강수 패턴과 매우 유사한데 실제 해수면온도 합성장을 보면 다소 약하긴 하지만 동태평양에서 음의 기온편차가 나타나 라니냐 타입의 해수면온도를 보여준다. 즉 호주 북쪽의 가을철 해수면온도가 높아지는 경향이 있으면 적도 태평양은 라니냐로 가는 경향이 있고 그와 연관되어 서태평양(특히, 필리핀해 부근)에서 강수가 강화되면 파동 전파를 통해 2월 우리나라와 일본을 지역에 상층 저기압성 편차가 발달하고 하층에서는 북풍계열 바람 편차가 강해져 우리나라와 동아시아는 평년보다 추운 경향을 보인다.

호주 북쪽의 해수면온도가 낮아지는 경향일 때의 해수면온도와 강수의 합성장을 보면(Fig. 4.3.6) 반대의 경우와 대칭적인 특징이 뚜렷하지는 않다. 특히 해수면온도는 엘니뇨와 연관된 패턴은 전혀 나타나지 않는다. 강수패턴은 가을철부터 겨울까지 지속적으로 나타나지는 않지만 겨울철에는 전반적으로 서태평양지역에서 강수가 감소하는 경향, 중태평양에서는 증가하는 경향이 약하게 나타난다. 이와 연관된 2월 순환장 패턴을 보면 호주 북쪽 해수면온도 경향이 양일 때와 전반적으로 대칭적인 특징을 보여주어 동아시아와 우리나라는 평년보다 따뜻한 경향을 보여준다. 해수면온도와 강수에서 대칭적인 특징이 뚜렷하지 않은 이유에 대해서는 보다 상세한 연구가 필요할 것으로 보인다.

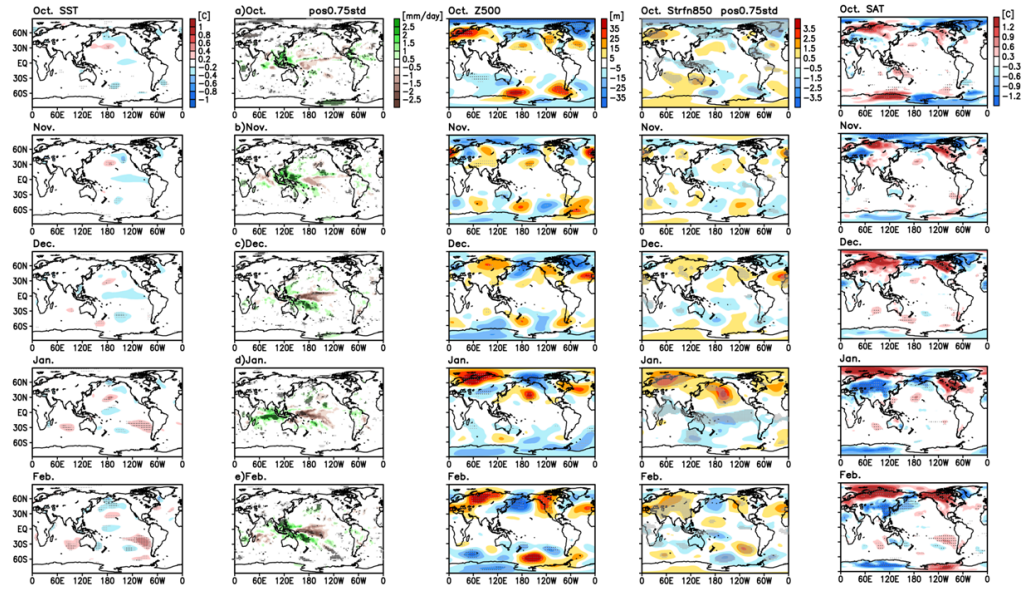


Figure 4.3.5 Composite map of the SST(the first column), precipitation (the second column) and geopotential height anomalies at 500 hPa(the third column), stream function at 850 hPa and SAT(the fourth and fifth column) in the years when the SST tendency(Oct.–Sep.) in the north of Australia is larger than its +0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

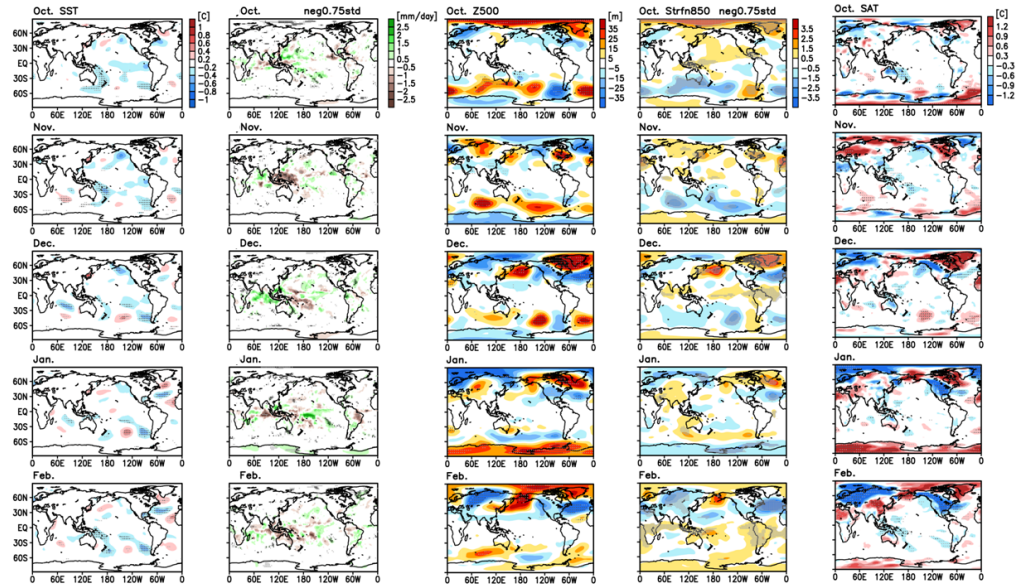


Figure 4.3.6 Same as Figure. 4.3.6 but for in the years when the SST tendency(Oct.–Sep.) over the north of Australia is smaller than its -0.75 standard deviation..

4.3.1.3 10월 걸프해류 해수면온도

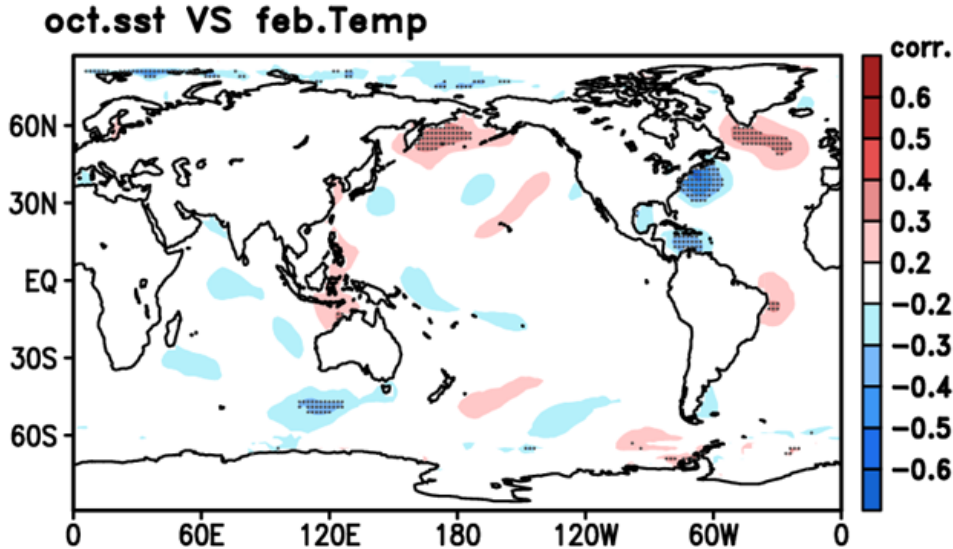


Figure 4.3.7 Lag-correlations between the SST anomalies(October - September) and the SAT in the Korean Peninsula in February.

우리나라 2월 기온과 10월 해수면온도 사이의 지연상관성을 조사하면 ENSO와 연관된 패턴은 발견되지 않는다. 하지만 북미 동안의 북대서양에서 통계적으로 유의한 상관성이 나타난다. 특히 걸프해류 지역($285^{\circ} \sim 305^{\circ}E$, $35^{\circ} \sim 50^{\circ}N$)에서의 해수면온도와 강한 음의 상관성이 나타났다(Fig. 4.3.7).

걸프해류 지역 해수면온도와 우리나라 2월 기온 사이의 상관성이 물리-역학적으로 연관되어 있는지를 조사하기 위해 이 지역의 해수면온도를 평균하여 지수로 정의하고 위상에 따라 해수면온도, 해빙, 순환장 및 지상기온에 대해 합성분석을 하였다. 10월 걸프해류 부근의 해수면온도가 높으면(Fig. 4.3.8) 10월 유라시아 북쪽 바렌츠, 카라, 랍테프 및 북시베리아 해 전역에서 해빙이 매우 적은 특징이 나타나고 바렌츠 해의 해빙은 11월부터 2월까지도 평년보다 적은 경향이 뚜렷하다. 이러한 해빙의 감소와 연관되어 북유럽 및 우랄 산맥 부근 고기압성 편차가 지속적으로 나타나고 그 풍하측인 동아시아와 우리나라 부근에는 기압골이 발달해 2월 우리나라는 평년보다 낮은 기온이 나타나는 경향이 있다. 반대로 걸프해류 지역 해수면온도가 낮을 경우(Fig. 4.3.9)에는 높을 경우와 대칭적인 특징이 뚜렷하여 우리나라는 평년보다

높은 경향을 보여준다.

이러한 해석은 앞서 제시한 10월 바렌츠 해 해빙에 의한 우리나라 기온변동의 역학과 매우 유사하여 이 두 인자가 완전히 독립적이라고 판단하기는 어렵다. 하지만 이 두 인자가 같은 변동을 다른 변수로 설명하고 있지는 않은 것 같다. 통계적으로도 두 지수 사이의 상관성은 0.25로 95% 신뢰수준을 만족하지 못한다. 또한 10월 바렌츠 해 해빙이 적을 때의 2월 해빙 농도가 적은 경향에 비해 걸프해류 지역에서의 해수면온도가 높을 때 2월 해빙 감소의 경향이 훨씬 뚜렷하게 나타나는 것은 역학적으로 매우 중요한 의미를 가질 수 있다. 10월 걸프해류 해수면온도가 높을 때에 11월부터 겨울철까지 걸프해류와 대서양에서 전반적으로 해수면온도가 높은 경향이 있고 그래서 바렌츠 해로 들어가는 난류가 더욱 따뜻할 가능성이 있어 2월에도 해빙의 감소가 크게 지속되는 것에 기여할 가능성이 있다. 또한 최근 연구들은 걸프해류가 따뜻할 때 만들어지는 풍하층(유라시아 대륙)으로의 원격상관 패턴(북유럽 및 우랄산맥 부근 부근 고기압성 편차)에 의해 중위도의 열이 극으로 수송되어 카라-바렌츠 해 해빙이 더 많이 녹을 수 있음을 제시하고 있다(Ok et al. 2016; Sato et al. 2014). 즉 가을철 많이 녹은 바렌츠 해 해빙의 메모리로 늦겨울까지 녹아 있는 것 보다 걸프해류 지역 해수면온도가 높으면 2월까지 훨씬 넓은 면적에서 많이 녹아 있을 수 있다. 따라서 10월 바렌츠 해 해빙 인자는 해빙의 자체적 내부(internal) 메모리와 성층권을 통한 우리나라 2월 기온에 영향을 미친다고 할 수 있고 걸프해류 해수면온도 인자는 따뜻한 걸프해류에 의한 해양의 영향과 대기 강제력 역할에 의해 2월까지 바렌츠 해 해빙이 평년보다 많이 못 덮이게 하고 그와 연관되어 유발된 파동전파에 따른 해빙의 감소로 동아시아와 우리나라 상층에 기압골을 강화시켜 기온이 평년보다 낮게 만드는데 기여하는 것 같다. 따라서 본 연구에서는 두 인자를 모두 예측인자로 활용하였다.

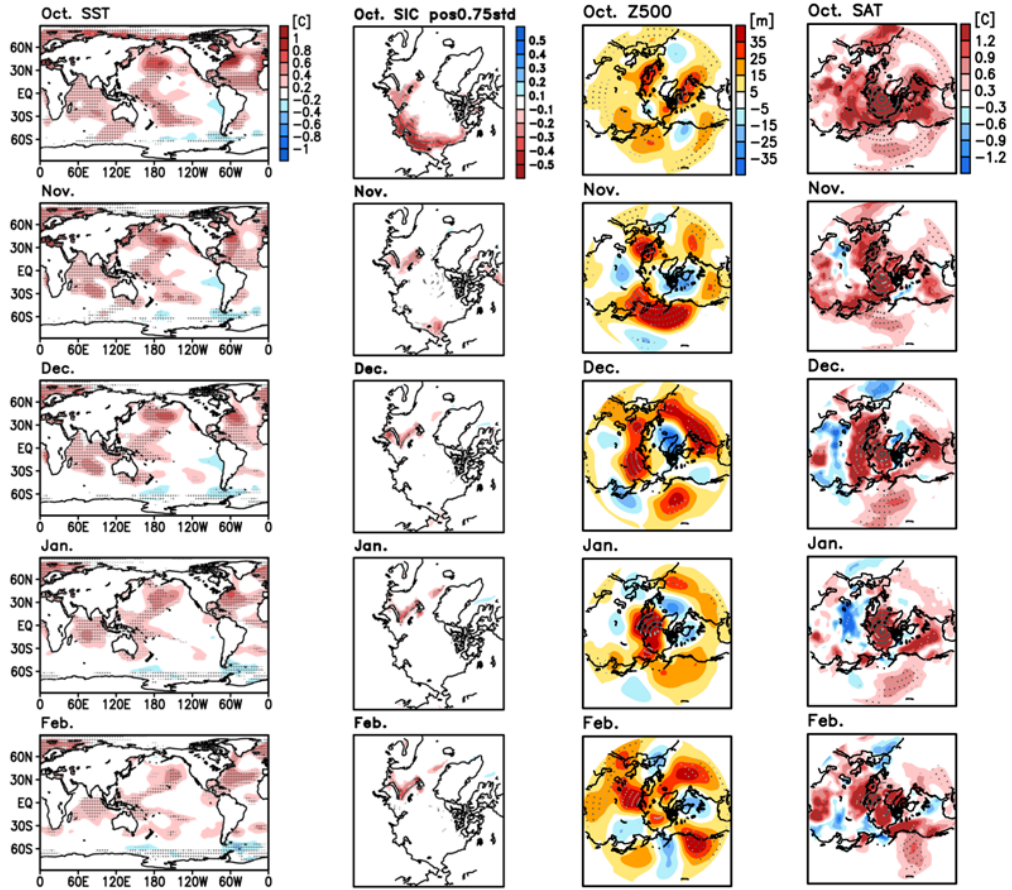


Figure 4.3.8 Composite map of the SST(the first column), SIC (the second column) and geopotential height at 500 hPa(the third column) and SAT anomalies(the fourth column) in the years when the SST over the Gulf stream region is larger than its +0.75 standard deviation. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

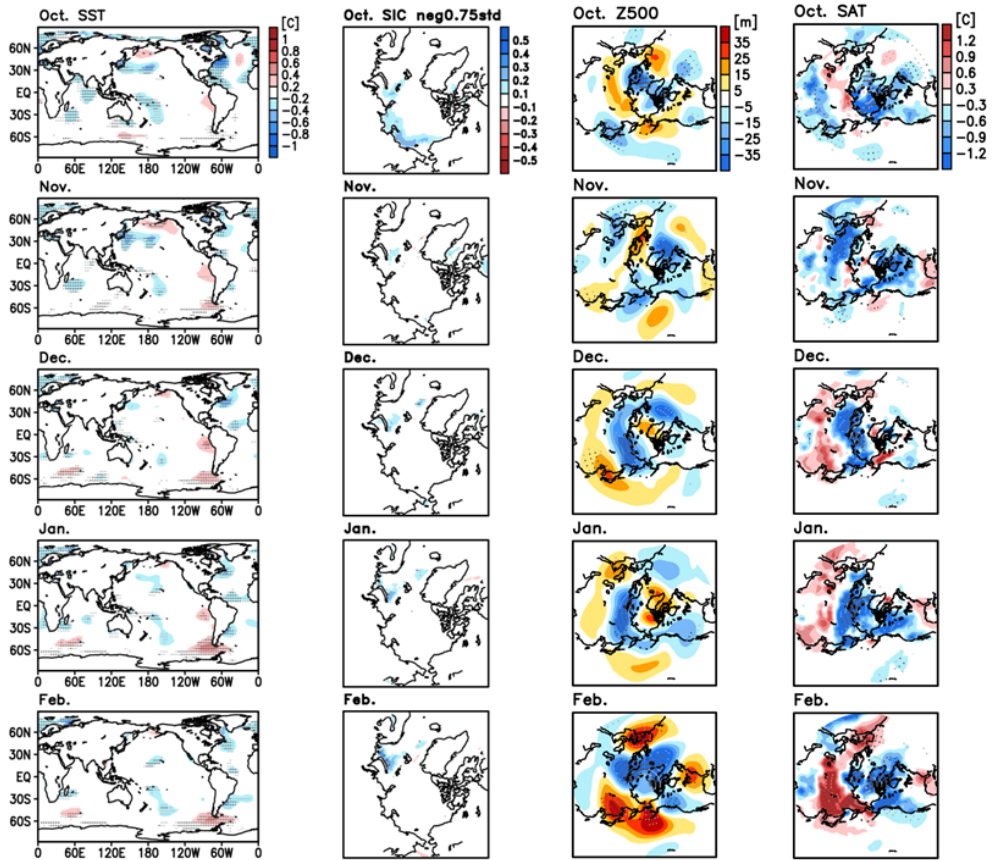


Figure 4.3.9 Same as Figure. 4.3.9 but for in the years when the SST over the Gulf stream region is smaller than its -0.75 standard deviation.

4.3.2 2월 기온 통계예측 모델 및 검증

4.3.1절에서는 선행연구와 본 연구에서의 분석을 통해 우리나라 2월 기온과의 상관성이 나타나는 3개의 예측인자를 선정하였다. 과적합(Overfitting)의 문제를 확인하기 위해 인자 간 상관성을 조사한 결과(Table 4.3.1), 10월 바렌츠 해 해빙농도 인자는 호주 북쪽 해수면온도 및 걸프해류 지역 해수면온도와 각각 -0.26과 +0.25의 상관성이 나타나지만, 95% 수준에서 통계적으로 유의하지는 않아 인자 간 독립성을 가정하기에 무리가 없다고 판단되어 다중선형회귀를 이용해 통계예측 모델을 구축하였다.

$$SAT_{pred\cdot Feb} = 0.41* SIC_{barents} - 0.54*SST(Tendency)_{naus} - 0.52*SST_{gulf} \quad (4.3)$$

* 우리나라 기온과 예측인자들의 선형추세는 제거되었음

Table 4.3.1 Correlations coefficients between the SAT over the Korean Peninsula in February and the predictors. And correlation coefficient among the predictors for the SAT. Symbol ‘**(*)’ indicates the value which is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

변수	10월 바렌츠 해 해빙농도	호주 북쪽지역 해수면온도 경향 (10월 - 9월)	10월 걸프해류 해수면온도
2월 우리나라 기온	0.43**	-0.52**	-0.46**
10월 바렌츠 해 해빙농도		-0.26	-0.25
호주 북쪽지역 해수면온도 경향 (10월 - 9월)	×		-0.22
10월 걸프해류 해수면온도	×	×	

통계 모델이 예측한 우리나라 2월 기온과 관측 기온 사이의 상관계수는 0.66으로 준수한 예측 성능을 보여주는 것으로 생각된다(Fig. 4.3.10). 2월 통계 모델이 얼마나 안정적으로 예측을 수행하는지 조사하기 위해 12월 및 1월과 마찬가지로 두 가지

교차검증 방법(Conv_CV와 Odd_Even_CV)을 사용하여 테스트하였다(Fig. 4.3.11). Conv_CV의 경우, 관측 기온과의 상관계수는 0.61이었고 교차검증 중 다중회귀 계수의 변화도 거의 없어 특정 해의 영향이 크게 반영되지 않고 안정적인 예측 수행이 가능한 것으로 판단되었다. 동아시아 겨울몬순의 2년 주기 변동을 고려하여 인접한 해의 효과를 제거한 Odd_Even_CV를 시행하였을 경우 0.55의 상관계수를 보여 두 가지 방법에서 모두 큰 상관성의 감소 없이 99% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 하지만 1월 기온 예측 모델과 마찬가지로 각각의 예측인자와 우리나라 2월 기온 사이의 상관성이 높지 않으므로 다중선형 회귀를 이용해서 예측성을 향상시키는 것은 한계가 있었다. 그럼에도 불구하고 1월에 비해 2월의 예측인자들은 훈련 기간동안 2월 기온과 비교적 안정적인 상관성을 유지하여(Fig 4.3.12) 1월 모델이 비해 Conv_CV의 상관성이 다소 높고 RMSE가 소폭 작은 특징을 보이는 것으로 판단된다.

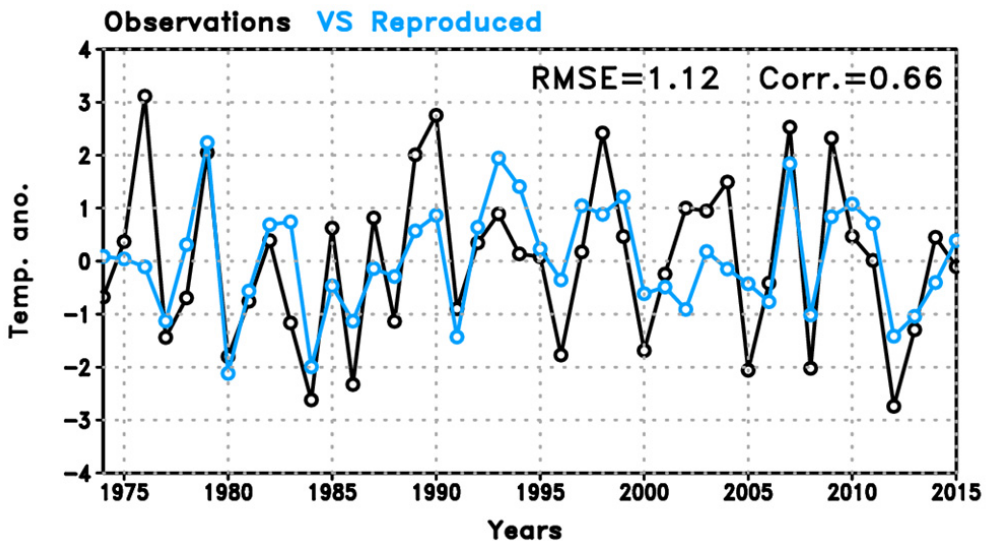


Figure 4.3.10 Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in February(Black circle line) and the reproduced SAT by the statistical model based on the predictors(Blue circle line). RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

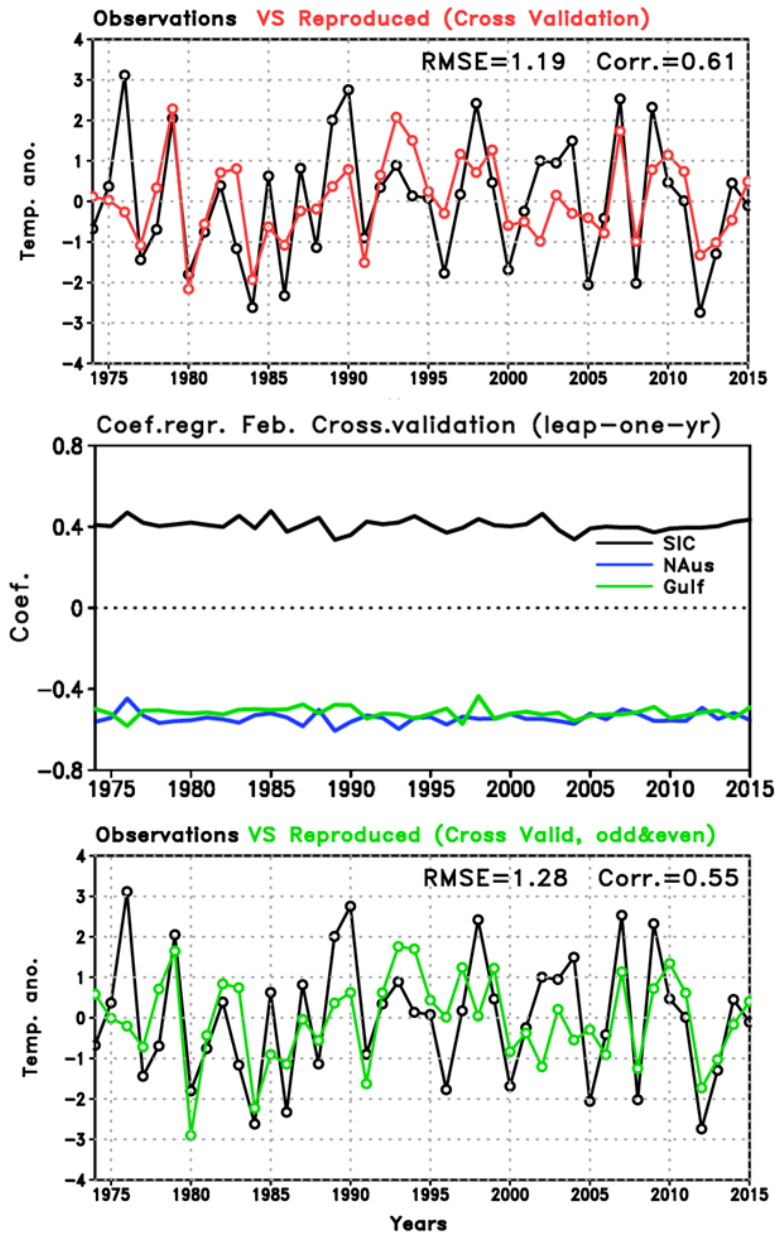


Figure 4.3.11 (Upper row) Timeseries comparison between the observational SAT over the Korean Peninsula in February and the SAT(Black circle line) in the cross validated hindcast prediction by the conventional leave-one-out cross validation(Conv. CV). (Middle row) Variation of multiple regression coefficients of the predictors in leave-one-out cross validation. (Lower row) same as the upper row but for Odd&Even CV. RMSE and Corr. represent the root mean square error and correlation coefficient.

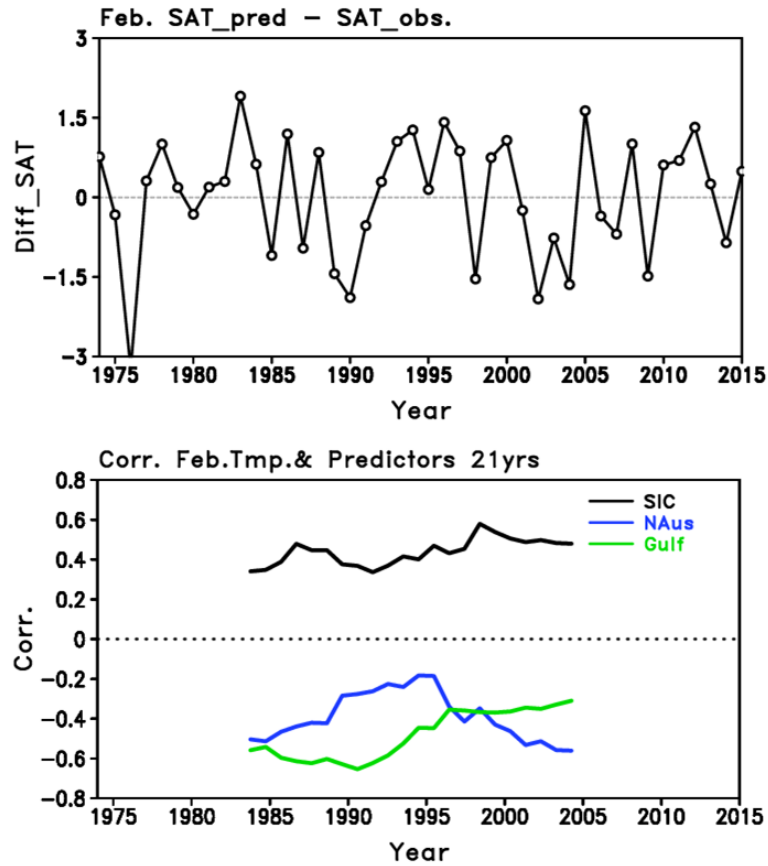


Figure 4.3.12 (Upper row) Deviation of the predicted SAT from the observation SAT in February. (Lower row) Running correlation with 21-year window between the SAT in February and its predictors during 1973 ~ 2015.

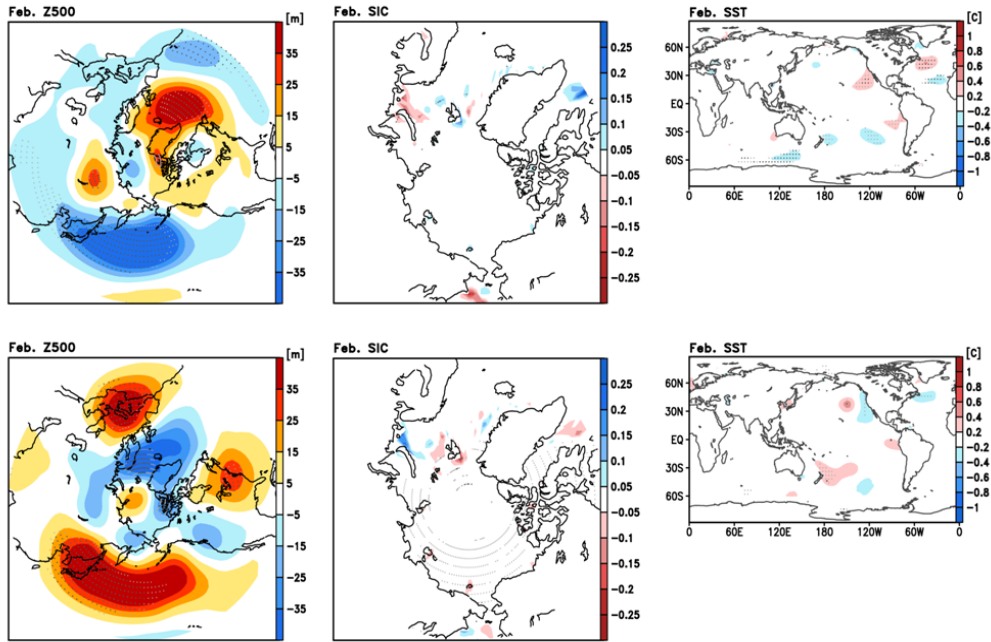


Figure 4.3.13 Composite map of the geopotential height, SIC and SST anomalies over the northern hemisphere in the years when the difference between observational SAT and predicted SAT in February is larger(smaller) than its $+0.75(-0.75)$ standard deviation in upper(lower)-row. The black(gray) dots represent regions where is statistically significant at a 95%(90%) confidence level.

앞서 12월과 1월의 기온 통계 모델에서처럼 2월 예측 모델의 오차를 유발하는 특정 순환장 패턴이나 기후인자가 존재하는지를 조사하기 위해 양으로 오차가 큰 경우와 음으로 오차가 큰 경우를 나누어 합성분석을 수행하였다(Fig. 4.3.13). 해수면 온도에서는 뚜렷한 시그널을 찾기가 어려웠지만 북극 해빙 특히 바렌츠 해에서의 해빙에서는 대칭적인 시그널이 보였다. 모델이 관측보다 따뜻하게 예측한 경우에 실제 2월 바렌츠 해에서는 해빙이 평년보다 많이 녹은 경향이 있었고 반대로 모델이 우리나라 기온을 실제보다 차갑게 예측한 경우에는 해빙이 많은 경향을 보였다. 예측인자와 2월 기온 사이의 상관관계로 볼 때, 해빙이 적은 경우 우리나라는 추운 경향이 있는데, 오차가 양으로 클 때 해빙이 적은 경향이 나타나는 경향이 있다는 것은 해빙이 적었음에도 불구하고 우리나라 기온이 따뜻했던 사례를 모델이 예측하지 못했던 것으로 판단된다. 사실 10월 예측인자로 2월의 해빙의 변동을 완전히 설명할 수는 없기 때문에 오차가 유발되었을 가능성이 있다.

해빙 연관되어 오차를 유발한 것도 하나의 원인이지만, 오차와 연관된 상층 순환장 패턴을 보면 오차가 양(음)으로 클 때, 전반적으로 북극지역은 양(음)의 지위고도 편차, 중위도는 음(양)의 지위고도 편차를 보여 음(양)의 AO와 매우 유사한 패턴을 보여준다. 다시 말하면 양(음)으로 오차가 클 경우, 실제로 2월에는 음의 AO가 나타나 우리나라는 예측값보다 추웠던 것을 의미하여 이 모델에 사용된 예측인자들이 2월 AO와 연관된 순환장의 변동을 예측하고 설명하기 어려웠다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 겨울철 현업 기온 예측의 정확도 향상에 도움이 되는 분석기반의 예측 및 통계 정보를 생산하기 위해 우리나라 겨울철 기온과 통계적-물리-역학적인 상관성에 있는 기후감시인자와 예측인자를 발굴하였다. 또한 발굴된 예측인자에 기반하여 겨울철 월 별 통계 예측모형을 구축하고 그 안정성을 테스트하였다.

우리나라 겨울철 기온 변동은 동아시아 겨울 몬순의 영향을 지배적으로 받으므로 시베리아 고기압과 알루산 저기압의 변동과 직접적으로 연관되어 있다. 이러한 동아시아 겨울 몬순과 직접적으로 관련된 인자 이외에 우리나라 겨울 기온 변동은 AO, ENSO, 카라-바렌츠 해빙(우랄 블로킹) 그리고 WP 패턴 등과 통계적으로 높은 상관성을 보였다. 잘 알려진 것처럼 AO는 우리나라 겨울철 모든 월에서 기온과 유의한 상관성을 보였고 ENSO의 경우는 12월, 바렌츠 카라 해 해빙은 12월과 2월, WP 패턴의 경우는 12월과 1월에 각각 통계적으로 유의한 상관성을 보였다. 또한 상관성의 검증 위해 실제 각 기후인자의 위상에 따른 우리나라 관측 지상기온의 경향성을 조사한 결과, 각 기후인자 별로 상관성이 나타나는 월에서는 상관성과 일치하는 기온의 경향성이 뚜렷하였다. 이런 기후감시인자들 중에는 동시상관성뿐만 아니라 지연상관성이 있어 예측인자로 활용 가능한 인자(ENSO, 해빙)도 있지만 자연변동성분이 지배적이어서 예측에 활용하기 힘든 인자(AO, NAO, WP 패턴)도 있다. 하지만 이러한 기후인자들은 지속적으로 감시하여 기후 진단 및 분석 등에 활용하고 정성적으로 예측에 활용할 필요가 있다.

실제 월 별 기온 예측 모델 구축에 필요한 예측인자를 찾기 위해 선형 추세가 제거된 우리나라 기온과 다양한 변수들과 지연상관성을 계산하고 통계적 상관성이 나오는 기후인자 중, 물리-역학적으로 우리나라 겨울 기온과 연관성이 있는 기후예측인자를 발굴하였다. 뿐만 아니라 현업 계절 예측 정보 생산 체계를 고려하여 생산 일정 내에서 자료 확보가 가능한 기후인자만 예측인자로 활용하여 통계예측 모델을 구축하였다. 월 별 예측인자와 실제 월 별 예측을 위한 다중선형 회귀식은 표 5.1에 요약하였다.

Table 5.1 Predictors and multiple regression formular for predicting the SAT over the Korean Peninsul in individual month of the winter season.

월		예측인자	
12월	9월 카라-랍테프 해 해빙농도 (SIC_{kalapt})	동태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월) ($ENSO$)	10월 유라시아 눈덮임속도 (SAI)
1월	10월 카라 해 해빙농도 (SIC_{kara})	적도 태평양 해수면온도 경향 (10월 - 9월)의 동서경도 (동태평양 - 서태평양) ($ENSO_{like}$)	10월 타미르반도 Z500 ($Z500_{Tamyrr}$)
2월	10월 바렌츠 해 해빙농도 ($SIC_{barents}$)	가을철 호주 북쪽 해수면온도 경향 (10월 - 9월) ($SST(Tendency)_{naus}$)	10월 걸프해류 지역 해수면온도 (SST_{Gulif})
월		통계 모델 (다중선형 회귀식)	
12월		$SAT_{pred} = 0.62 * SIC_{kalapt} + 0.62 * ENSO - 0.27 * SAI$	
1월		$SAT_{pred-Jan} = 0.41 * SIC_{kara} + 0.61 * ENSO_{like} - 0.48 * Z500_{Tamyrr}$	
2월		$SAT_{pred-Feb} = 0.41 * SIC_{barents} - 0.54 * SST(Tendency)_{naus} - 0.52 * SST_{gulf}$	

1973-2015년의 훈련기간에서 12월 기온 예측 모델에 의해 생산된 지상기온과 실제 우리나라 관측 기온과의 상관계수는 0.75로 매우 높은 예측성을 보여주었다. 예측의 안정성을 확인하기 위해 실시한 두 가지 교차검증에서도 모두 0.7 이상의 높은 상관성을 보여 안정적인 예측이 가능함을 보였다. 12월 기온 예측 모델의 경우, 기본적으로 예측인자와 우리나라 기온 사이의 상관성이 높았고 또한 이 상관성이 훈련기간 동안 크게 변하지 않고 지속적으로 유지되는 것이 높은 예측성능에 기여하는 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 통계 모델은 실제 관측 기온의 변동을 모두 설명하지 못하므로 예측과 관측사이의 오차가 어디서 오는지를 조사하기 위해 오차와 연관된 순환장 패턴을 조사하였는데 북대서양 지역에서 진행되어 오는 파동 패턴이 뚜렷하였고, 이는 12월 예측 모델에 사용된 예측인자로써 북대서양에서 전파되어오는 원격상관과 연관된 기온 변동을 완전히 설명하지 못하여 오차가 발생할 수 있음을 의미한다.

1월 기온 예측 모델의 경우에 예측 기온과 관측 기온 사이의 상관계수는 0.66으로 12월에 비해 다소 낮지만 예측에 유용한 정보를 제공할 수 있는 예측성을 보여주는 것으로 생각된다. 12월에 비해 다소 낮은 상관성을 보여주는 것의 기본적으로 예측인자와 1월 사이의 기온의 상관성이 다소 낮은 것이 원인으로 판단된다. 또 하나 영향을 미친 것은 각 예측인자와 1월 기온 사이의 상관성이 훈련 기간 내에서 일정하지 못하고 상관성이 매우 약해지는 기간이 존재하기 때문으로 판단된다. 통계적 상관성 강약과 그것의 변동과 연관된 오차뿐만 아니라 실제 모델이 설명하지 못하는 기온 변동성과 연관된 패턴을 찾기 위해 1월 예측 기온과 실제 관측과의 오차와 연관된 패턴을 조사한 결과, 12월과 비슷하게 우리나라 풍상측에서 전파되어오는 파동 패턴이 뚜렷하게 나타났고 1월 기온 예측을 위해 사용된 예측인자들도 우리나라 풍상측의 파동 패턴과 연관된 기온 변동을 완전히 설명하지 못하여 오차가 발생하는 것으로 추측된다.

마지막으로 2월 예측 모델도 안정적이고 준수한 예측성능을 보여준다(관측 기온과의 상관관계 : 0.66). 훈련 기간 동안 예측인자와 2월 기온 사이의 지속적인 상관성을 보여 1월에 비해서는 RMSE가 낮고 교차검증 때의 상관성도 다소 높은 특징을 보여준다(교차검증 기온과 관측과의 상관성 : 0.61). 하지만 2월의 경우에는 모델과 관측 사이의 오차와 연관된 패턴은 12월 및 1월과 다소 차이를 보였다. 2월 예측 모델의 오차는 10월 해빙 예측인자가 2월의 해빙 상태를 완전히 설명할 수 없는 것과 연관되어 발생했을 가능성이 있다. 또한 오차와 연관된 순환장 패턴이 전반적으로 AO 유사한 것으로 볼 때, AO와 연관된 우리나라 2월 기온변동을 예측 모델이 설명하지 못하는 것도 오차가 발생의 한 원인일 것으로 생각된다.

본 연구에서 개발된 겨울철 월 별 예측 모델은 겨울철 평균 기온을 예측하는 기존의 모델(기상청 2015)보다 활용도가 높을 것으로 생각되고 특히, 물리·역학적으로 연관된 예측인자를 사용하였으므로 모델의 안정성 면에서 장점을 가질 것으로 판단된다. 실제 기존의 모델은 1979-2008년의 훈련기간을 통해 예측모형을 만들고 그 이후를 예측하면 예측한 기온이 관측과의 큰 오차를 보였지만, 본 모델에서는 1973 ~ 2008년까지의 자료만 활용하여 예측모형을 구성하고 그 이후는 예측을 수행한 결과, 12월, 1월, 2월 모두에서 관측의 기온 경향을 잘 예측하는 것으로 나타났다(not shown). 특히 1973 ~ 2015년의 기간에 대해 만든 모델과 1973 ~ 2008년 동안의 모

델이 차이가 적었고 이는 월 별 모델이 최소한 1973 ~ 2015년 기간 동안에는 안정적으로 구축되었음을 의미할 수 있다.

하지만 이 모델들은 선형 추세가 제거된 상관성에 기반하여 구축되었으므로 실제 현업에 활용할 때에는 선형 추세에 대한 고려가 있어야 한다. 12월에는 1973 ~ 2015년 기간에 선형 추세가 거의 없어 통계 모델의 결과를 직접 활용해도 무방할 것으로 생각된다. 하지만 1월과 2월은 증가 추세가 뚜렷하고 특히, 2월은 통계적으로 유의한 강한 증가 추세가 있어 실제 현업에 활용할 때 이에 대한 고려가 필요하다. 이를 위해 1월과 2월에 대해 선형 추세를 하나의 예측인자로 간주하고 모델을 구축하여 예측성 테스트를 실시하였는데, 1월 예측 기온과 관측 기온 사이의 상관성은 0.69, 2월에는 0.73으로 변동성만을 고려했을 때보다 다소 향상되었다. 특히 2월에는 예측인자 별 기여도에서 선형 추세가 중요한 역할(선형 추세의 다중회귀 계수 : 0.62)을 하는 것으로 나타나 실제 현업에 활용할 때 필수적으로 고려될 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 정리된 기후 감시인자 및 예측인자 그리고 그에 기반한 우리나라 겨울철 월 별 기온 예측 모델이 실제 현업의 기후 감시 및 분석 그리고 계절 예측성 향상에 기여할 수 있기를 기대한다.

6. 토론-선형 통계예측 모델의 한계

본 연구에서는 계절 예측 현업에 활용 가능한 우리나라 겨울철 기온 예측 모델을 개발하였다. 준수한 예측성을 보이는 월 별 예측 모델을 구축하였지만 여전히 우리나라 겨울철 기온의 경년 변동을 일부 설명하지 못하여 모델을 개선하기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

본문에서도 언급하였듯이 본 연구에서 개발된 다중 선형회귀 모델의 예측성을 떨어뜨리는 원인은 여러 가지가 있지만, 가장 근본적인 것은 예측인자와 기온 사이의 상관성이라고 생각된다. 특히 훈련기간 동안 예측인자와 기온 사이의 안정적인 상관성의 유지가 매우 중요한 요소인 것 같다. 30년 이상의 훈련기간 동안 지속적인 상관성을 유지한다는 것은 예측인자가 우리나라 기온과 역학적으로 밀접하게 연관되어 있을 가능성이 높아 좋은 예측인자가 될 수 있다. 이러한 측면에서 예측 인자 선정에 있어 다양한 통계적 툴을 활용하여 노이즈가 제거된 시그널을 활용하는 것도 좋은 방법이라 생각된다. 본 연구에서 예측 모델을 구축하기 위해 사용된 예측인자들은 모두 특별한 통계적 가공이 없이 상관성이 나타나는 영역에서 평균된 지수를 사용하였다. 이는 현업 업무를 수행하는 사람이 예측인자를 직관적으로 이해하기 쉽고 준 실시간으로 현업에서 모니터링하여 정성적으로 예측에 활용하기 좋은 측면이 있다. 하지만 통계적 가공이 없기 때문에 노이즈가 많이 포함되어 있어 상관성이 높은 예측인자를 확보하기가 힘든 측면이 있고, 예측인자 간 상관성도 높아져 최종적으로 만들어진 모델도 예측성을 향상시키는데 한계가 있는 것 같다. 따라서 통계적 툴을 활용하여 노이즈가 제거된 자료로부터 예측인자를 발굴하거나 우리나라 겨울 기온에 영향을 미치는 기후인자에 대해 물리-역학적으로 접근하여 새로운 예측인자를 발굴하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

또한 다수의 좋은 예측인자의 발굴은 안정적인 모델 구축에 있어서도 도움이 된다. 예측인자를 다수 발굴하면 다중 선형회귀 모델을 구축하기 위한 예측인자의 개수 및 예측인자의 조합에 대해서 민감도 테스트 및 교차검증이 가능해져 가장 안정적이고 좋은 예측성을 보이는 모델 구성이 가능해진다. 하지만 본 연구에서는 겨울철 월 별 기온 예측 모델을 물리·역학적으로 관련된 예측인자에 기반해서 구축하고자 하였으므로 소수의 예측인자만을 발굴할 수 있었고, 다양한 예측인자를 활용하여 예측모

모델을 구축할 수 없는 한계가 있었다. 안정적이고 높은 예측성을 가지는 모델의 구축을 위해 우리나라 기온 변동과 연관된 기후인자에 대한 역학적인 연구와 함께 다양한 예측인자 발굴이 중요한 것으로 생각된다.

다중선형 회귀 모델의 태생적 한계는 훈련기간 동안의 예측인자와 기온사이의 상관성을 기반으로 모델을 구축하고 예측하는 것에서 비롯된다. 가장 먼저 훈련기간 동안은 좋은 예측성을 보이지만 이후 예측기간에서는 선정된 예측인자와 우리나라 기온 사이의 상관성이 훈련기간과 다를 경우 예측성은 현저히 떨어지게 될 것이다. 본 연구에서 개발된 모델의 경우에도 그 한계에서 자유로울 수 없다. 실제 최근 연구결과는 ENSO와 동아시아 사이의 관계에 장기 변동성이 있고 최근 그 상관성이 높아지고 있음을 보고하고 있다. 이는 ENSO와 동아시아 사이의 관계가 낮아지면 본 모델에서 사용된 ENSO관련 예측인자는 예측성을 떨어뜨리는 요인이 될 수도 있다. 따라서 우리나라 기온 변동과 연관된 기후인자를 더 많이 발굴하고 상관성의 장기 변동 및 원인에 대한 연구도 함께 진행되어 지속적인 통계 모델의 개선이 이루어지고 통계 모델에 의해 생산된 예측 정보의 합리적인 해석에도 활용할 필요가 있다.

다중 선형 회귀 모델에서 오차를 유발할 수 있는 또 다른 요인은 모델이 예측인자와 기온사이의 관계의 비대칭성을 고려하기는 어렵다는 것이다. 예를 들어 ENSO는 우리나라 겨울철 기온과 통계적으로 유의한 상관성이 나타나지만 ENSO의 두 위상인 엘니뇨와 라니냐 때의 우리나라 및 동아시아 기온의 경향을 보면 엘니뇨 때가 라니냐 때에 비해 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다. 하지만 통계 모델에서는 예측인자의 값에 따라 선형적으로 예측값에 기여하기 때문에 이러한 효과를 반영하기 힘들어 오차를 유발할 수 있다.

이러한 한계를 극복하고 예측성 향상을 위해서는 실제 예측인자들의 비대칭성과 같은 기본적인 특성 연구와 예측인자와 기온 사이의 상관성이 어떤 기후인자에 의해 조절되는지에 대한 역학적인 연구가 필요하다. 이와 동반되어 비대칭성과 상관성의 변동의 특성을 실제 통계 모델에 반영할 수 있는지에 대한 고민이 필요가 있을 것 같다. 이를 위해서는 다중선형 회귀 프레임 외에 다양한 통계적 방법을 통한 모형 개발도 생각해 볼 필요가 있다. 한 예로 베이지안(Bayesian) 모델을 활용할 경우, 예측인자와 기온 사이의 관계를 확률론적으로 접근하여 어떤 다른 기후인자의 조건에 따른

예측인자와 기온사이의 관계를 확률로 나타내어 예측에 반영하는 것이 가능할 것 같다. 이러한 다른 통계 모델 프레임을 조사하고 적용가능성을 파악하여 보다 높은 예측성을 가진 통계 모델을 개발할 필요가 있어 보인다.

REFERENCE

- 기상청, 2012: ‘기후예측모델 개발 중장기 로드맵’ 보고서
- 기상청, 2015: ‘방권 요소 기반 동아시아 계절예측 향상 기술개발에 관한 연구’ 보고서.
- 기상청, 2016: ‘장기예보 업무편람’
- Ahn, J. B., and H. J. Kim, 2014: Improvement of 1-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteor. Appl.*, 21, 415–418, doi:10.1002/met.1372.
- Alexander, M. A., D. J. Vimont, P. Chang, and J. D. Scott, 2010: The impact of extratropical atmospheric variability on ENSO: Testing the seasonal footprinting mechanism using coupled model experiments. *J. Climate*, 23, 2885–2901, doi:10.1175/2010JCLI3205.1.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, 104, 30 937–30 946, doi:10.1029/1999JD900445.
- _____, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 294, 581–584.
- Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083–1126, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2
- Capotondi, A., and Coauthors, 2015: Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 921–938, doi:10.1175/BAMS-D-13-00117.1.
- Cai, W., and T. Cowan, 2009: La Nina Modoki impacts Australia autumn rainfall variability, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12805, doi:10.1029/2009GL037885
- Chen, W., J. Feng, R. Wu, 2013: Roles of ENSO and PDO in the Link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon, *J. Climate*, 26, 622–635
- Cohen, J., and J. Jones, 2011: A new index for more accurate winter predictions, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21701, doi:10.1029/2011GL049626
- _____, J., M. Barlow, P. Kushner, and K. Saito, 2007: Stratospheretroposphere coupling and links with Eurasian land-surface variability, *J. Climate*, 20, 5335–5343, doi:10.1175/2007JCLI1725.1.
- Feng J., J. Li, F. Zheng, F. Xie, and C. Sun, 2016: Contrasting Impacts of Developing Phases of Two Types of El Nino on Southern China Rainfall, *Journal of the Meteorological*

- Society of Japan, Vol. 94, No. 4, pp. 359–370, DOI:10.2151/jmsj.2016-019
- Fletcher, C. G., P. J. Kushner, and J. Cohen, 2007: Stratospheric control of the extratropical circulation response to surface forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21802, doi:10.1029/2007GL031626.
- Francis, J. A., W. Chan, D. J. Leathers, J. R. Miller, and D. E. Veron, 2009: Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer arctic sea-ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07503, doi:10.1029/2009GL037274.
- Garfinkel, C. I., D. L. Hartmann, and F. Sassi, 2010: Tropospheric precursors of anomalous Northern Hemisphere stratospheric polar vortices. *J. Climate*, 23, 3282–3299, doi:10.1175/2010JCLI3010.1.
- Gong, D.-Y., and C.-H. Ho, 2002, Siberian high and climate change over middle to high latitude Asia, *Theor. and App. Clim.*, 72, 1–9
- He S. and H. Wang, 2013: Oscillating Relationship between the East Asian Winter Monsoon and ENSO. *J. Climate*, 26, 9819–9838, <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00174.1>
- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009, Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079
- Huang, R., W. Chen, B. L. Yan, and R. H. Zhang, 2004: Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. *Adv. Atmos. Sci.*, 21, 407–424.
- Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke, and J. Cohen, 2012: Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus*, 64A, 11595, doi:10.3402/tellusa.v64i0.11595.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14704, doi:10.1029/2005GL02302.
- _____, T. Ou, H. W. Linderholm, B.-M. Kim, S.-J. Kim, J.-S. Kug, and D. Chen, 2011: Recent recovery of the Siberian High intensity, *J. Geophys. Res.*, 116, D23102, doi:10.1029/2011JD015904.
- Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new east Asian Winter Monsoon Index and associated characteristics of the winter monsoon, *J. Climate*, 17(4), 711–726, doi:10.1175/1520-0442(2004)017.
- Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, J.-H. Yoon, 2014, Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nature*

- Communications, 5, doi:10.1038/ncomms5646
- Kim, H.-J., and J.-B. Ahn, 2012, Possible impact of the autumnal North Pacific SST and November AO on the East Asian winter temperature, *J. Geophys. Res.*, 117, D12104, doi:10.1029/2012JD017527.
- Kim, H.-M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012a: Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere winter. *Climate Dynamics*, 39, 2957–2973
- Kim, J.-W., S.-W. Yeh, E. C.hang, 2014: Combined effect of El Niño–Southern Oscillation and Pacific decadal oscillation on the East Asian winter monsoon, *Clim. Dyn.*, 42,957–971
- Kim, S.-T., Sohn, S.-J., Kug, J.-S., 2016: Winter Temperatures over the Korean Peninsula and East Asia: Development of a New Index and its Application to Seasonal Forecast. *Climate Dynamics*. DOI : 10.1007/s00382-016-3402-2
- Kim, S.-Y., Kim, H.-S., Min, S.-K., Son, H.-Y., Won, D.-J., Jung., H.-S., Kug, J.-S., 2015: Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia and North Pacific associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pacific J. Atm. Sci.*51(1), 1–12, DOI:10.1007/s13143-000-0000-0
- _____, S.-Y. and J.-S., 2016: Kug: Asymmetry of inter-El Nino and -La Nina diversity. 2016년 가을 한국기상학회 초록집
- _____, S.-Y., H.-Y. Son and J.-S. Kug, 2016: What controls ENSO teleconnection to East Asia, 2016년 춘계 한국기상학회 기후분과 초록집, 4-5.
- King, M. P., M. Hell, and N. Keenlyside, 2015: Investigation of the atmospheric mechanisms related to the autumn sea ice and winter circulation link in the Northern Hemisphere,
- Kirtman, B. P., and Coauthors, 2014: The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 585–601, doi:10.1175/BAMS-D-12-00050.1. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-015-2639-5.
- Kolstad, E. W., and A. J. Charlton-Perez, 2011: Observed and simulated precursors of stratospheric polar vortex anomalies in the Northern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, 37, 1443–1456, doi:10.1007/s00382-010-0919-7.
- Kryjov b., 2015: October circulation precursors of the wintertime Arctic Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 35, 161–171.
- _____, and Y.-M. Min, 2016: Predictability of the wintertime Arctic Oscillation based on

- autumn circulation. *Int. J. Climatol.*, 36, 4181–4186, DOI: 10.1002/joc.4616
- Kumar, A, and M. P. Hoerling, 2000: Analysis of a conceptual model of seasonal climate variability and implications for seasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 255–264.
- Kug, J.-S., Jeong, J.-H., Jang, Y.-S., Kim, B.-M., Folland, C. K., Min, S.-K., Son, S.-W., 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature geoscience.*, 31, DOI: 10.1038/NGEO2517
- Lee, E.-J., J.-G. Jhun, and C.-K. Park, 2005: Remote connection of the northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *J. Climate*, 18, 4381–4393.
- Lee J.-Y., S.-S. Lee, B. Wang, K.-J. Ha, and J.-G Jhun, 2013: Seasonal prediction and predictability of the Asian winter temperature variability, *Clim. Dyn.* 41:573–587.
- Limpasuvan, V., D. W. J. Thompson, and D. L. Hartmann, 2004: The life cycle of Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings. *J. Climate*, 17, 2584–2596.
- Liu, Z., Xu, Z., Yao, Z. and H. Huang, 2011: Comparison of surface variables from ERA and NCEP reanalysis with station data over eastern China. *Theor. Appl. Climatol.*, 107, 611–621, doi:10.1007/s00704-011-0501-1
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3209–3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, (2014): Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2277
- Overland, J., J. A. Francis, R. Hall, E. Hanna, S.-J. Kim, and T. Vihma, 2015: The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? *J. Climate*, 28, 7917–7932, doi:10.1175/JCLI-D-14-00822.1.
- Overland, J. E., and M. Wang, 2010: Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus*, 62A, 1–9, doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
- Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European Multi-model Ensemble System for Seasonal-to-Interannual Prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 853–872.
- Park H.-J., and Ahn J.-B., 2015: Combined effect of the Arctic oscillation and the Western

- Pacific pattern on East Asia winter temperature, *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-01-2763-2
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and S. Yang, 2011, Relationship between Arctic Oscillation and Cold Surges over East Asia, *J. Climate*, 24(1), 68–83
- Peings, Y., D. Saint-Martin, and H. Douville, 2012: A numerical sensitivity study of the influence of Siberian snow on the Northern Annular Mode, *J. Climate*, 25, 592–607.
- Petoukhov, V., and V. Semenov, 2010: A link between reduced Barents–Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. Geophys. Res.*, 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568.
- Polvani, L. M., and D. W. Waugh, 2004: Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J. Climate*, 17, 3548–3554.
- Riddle E. E., Butler A.H., Furtado J.C., Cohen J. L., and Kumar A., 2013: CFSv2 ensemble prediction of the wintertime Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 41, 1099–1116. DOI: 10.1007/s00382-013-1850-5.
- Son, H.-Y., Park, J.-Y., Kug, J.-S., Yoo, J., Kim, C.-H., 2014: Winter precipitation variability over Korean Peninsula associated with ENSO. *Climate Dynamics*, 41, 11–12. DOI:10.1007/s00382-013-2008-1 (CA)
- Song K.-H. S.-W. Son and S.-H. Woo, 2015: Impact of Sudden Stratospheric Warming on the Surface Air Temperature in East Asia, *Atmosphere*, 25(3), 461–472.
- Sun, L., J. Perlwitz, and M. Hoerling, 2016: What caused the recent “Warm Arctic, Cold Continents” trend pattern in winter temperatures?, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL069024.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005a: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, 62, 4423–4440, doi:10.1175/JAS3629.1.
- _____, and H. Nakamura, 2005b: Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, 62, 4441–4449, doi:10.1175/JAS3628.1.
- _____, and H. Nakamura, 2013: Interannual variability of the East Asian winter monsoon and associated modulations of the planetary waves. *J. Climate*, 26, 9445–9461, doi:10.1175/JCLI-D-12-00842.1.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297–1300, doi:10.1029/98GL00950.

- _____, and J. M. Wallace 2001: Regional climate impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode, *Science*, 293, 85–89.
- Trenberth, K. E., G. W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N.-C. Lau, and C. Ropelewski, 1998: Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 103, 14 291–14 324, doi:10.1029/97JC01444.
- Vimont, D. J., D. S. Battisti, and A. C. Hirst, 2001: Footprinting: A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3923–3926.
- _____, D. S. Battisti, and A. C. Hirst, 2003a: The seasonal footprinting mechanism in the CSIRO general circulation models. *J. Climate*, 16, 2653–2667.
- _____, J. M. Wallace, and D. S. Battisti, 2003b: The seasonal footprinting mechanism in the Pacific: Implications for ENSO. *J. Climate*, 16, 2668–2675.
- Wang, B., Z. Wu, J. Liu, C.-P. Chang, J. P. Li, and T.-J. Zhou, 2010: Another look at climate variations of the East Asian winter monsoon: Northern and southern temperature modes. *J. Climate*, 23, 1495–1512, doi:10.1175/2009JCLI3243.1.
- Wang, L., W. Chen, and R. Huang, 2008: Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784–812, doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, and G.-H. Lim (2012), Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979–2011), *J. Geophys. Res.*, 117, D18117, doi:10.1029/2011JD016929.
- _____, B.-M. Kim, J.-S. Kug, 2015a; Temperature Variation over East Asia during the Lifecycle of Weak Stratospheric Polar Vortex. *Journal of Climate.*, 28, 5857–5872, DOI:10.1175/JCLI-D-14-00790.1
- _____, M.-K. Sung, S.-W. Son, J.-S. Kug, 2015b; Connection between weak stratospheric vortex events and the Pacific Decadal Oscillation. *Climate Dynamics*. DOI:10.1007/s00382-015-2551-z
- Wu, Z., X. Li, Y. Li, and Y. Li, 2016: Potential Influence of Arctic Sea Ice to the Interannual Variations of East Asian Spring Precipitation. *J. Climate* (online published).
- Wu, B. and R. D'Arrigo 2015: Patterns of Asian Winter Climate Variability and Links to

- Arctic Sea Ice, *J. Climate*, 28, 6841–6881.
- _____, J. Su, and R. Zhang, 2011: Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian high. *Chin. Sci. Bull.*, 56, 3220–3228, doi:10.1007/s11434-011-4696-4.
- Yu, L., R. A. Weller, and W. T. Liu, 2003: Case analysis of a role of ENSO in regulating the generation of westerly wind bursts in the Western Equatorial Pacific, *J. Geophys. Res.*, 108(C4), 3128, doi:10.1029/2002JC001498

연구보고서 2016-17

한반도 겨울철 기온 계절예측을 위한
기후인자 선정 및 통계 모델 개선

Improvement of statistical model and discovery of predictors for seasonal
prediction of winter temperature over the Korean Peninsula

우성호



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-168-8